文部省検定済教科書 | 7 実教 | 工業 065

電気技術ⅡA

実教出版

形名	用途	最大定格					しゃ断電流	
		V_{CB} [V]	V_{EB} [V]	I_C [mA]	P_C [mW]	T_j [°C]	I_{CBO} [μA]	V_{CB} [V]
2 SA 564	RF, AF	−25	−5	−100	250	125	−1	−10
634	PA	−40	−5	−3[A]	10[W]	150	−1	−30
673	RF, AF	−35	−4	−500	400	125	−0.5	−20
2 SB 415	PA	−32	−6	−1[A]	200	85	−14	−12
2 SC 371	RF	30	4	100	200	125	1	18
538	RF, AF	25	5	50	300	175	1	10
631	RF, AF, LN	25	6	100	250	120	0.2	25
633	RF, SW	25	6	100	250	120	0.2	25
710	RF	30	4	30	200	125	1	25
829	RF	30	5	30	250	125	1	10
945	RF, AF	60	5	100	250	125	0.1	60
1096	PA	40	5	3[A]	10[W]	150	1	30
1098	PA, SW	70	5	3[A]	10[W]	150	1	45
1514	RF, PA	300	5	100	1.25[W]	150		
1685	RF, AF	60	7	100	250	135	1	10
1815	AF	60	5	150	400	125	0.1	60
1906	RF	30	2	50	300	125	0.5	10
1921	RF	250	5	50	600	150	1	120
1942	SW	1500	6	3[A]	50[W]	150	10	600
1959	AF, SW	35	5	500	500	150	0.1	35
2229	AF, PA, SW	200	5	50	800	150	0.1	200
2371	RF	300	7	100	10[W]	150	0.1	200
2 SD 216	PA	60	5	1[A]	800	175	20	30
217	PA	120	7	7[A]	60[W]	150	500	80
389	PA	60	8	3[A]	25[W]	150	30	20

用途　AF：低周波増幅　RF：高周波増幅　LN：低雑音増幅　PA：電力増幅

タの規格表

(25〔°C〕)

直流電流増幅率			バイアス		h 定数				高周波特性	
h_{FE}	V_{CE}〔V〕	I_C〔mA〕	V_{CB}〔V〕	I_E〔mA〕	h_{fe}	h_{ie}〔kΩ〕	h_{re} $(\times 10^{-4})$	h_{oe}〔μS〕	f_T〔MHz〕	C_c〔pF〕
250	−5	−2	−10	1					80	2.7
100	−5	−1〔A〕	−5	100					55	75
60～320	−3	−10								
40～180	0	−3〔A〕	−1	100						
			6	−1	80				150	2.5
250	5	2	5	−2	250	3.5	2.5	35	150	4.5
350	3	1	6	−0.1		36	2.4	3.3	140	4.5
400	3	1	6	−2					140	4.5
90	6	1	6	−1					200	2
40～500	10	1	10	−1	130				230	1.3
200	6	1	6	−10					250	3
100	5	1〔A〕	5	−100					65	55
100	5	500	5	−100					60	40
30～200	20	20	20	−20					80	<4
250	10	2	10	−2	250	5	0.4	20	150	3.5
70～700	6	2	10	−1					>80	2
>40	10	10	10	−10					1000	1
30～300	6	10	6	−10					130	3
			5	−200					5	90
70～240	1	100	6	−20					300	7
70～240	5	10	30	−10					120	3.5
40～250	10	10	30	−10					80	
70	4	500	4	−100						
60	5	4〔A〕	10	−200					10	
70	3	1〔A〕	10	−200						

SW：スイッチング

昭和57年3月31日　文部省検定済　高等学校工業科用

電気技術ⅡA

大河内正陽

実教出版株式会社

監修

元専修大学教授 工学博士	大河内正陽

編修

東京工業大学教授 工学博士	安居院　猛
防衛大学校名誉教授 東京工芸大学教授 工学博士	押本愛之助
芝浦工業大学教授 工学博士	金子誠司
日本放送協会 総合技術研究所	日下秀夫
防衛大学校名誉教授 工学博士	斎藤隆仁
日本ENS株式会社 工学博士	寺村浩一
株式会社東芝 家電技術研究所	沼口安隆
国際電信電話 株式会社	福室　宏
防衛大学校教授 理学博士	宮川　浹

協力

東京都立小金井 工業高等学校教諭	赤沼岩男
元東京都立荒川 工業高等学校教諭	石井孝司
元東京工業大学付属 工業高等学校教諭	石坂陽之助
愛知県立名南 工業高等学校教諭	石田守雄
元東京都立葛西 工業高等学校教諭	市川　武
東京都立蔵前 工業高等学校教諭	伊藤恭史
元東京都立本所 工業高等学校長	緒方興助
東京都立町田 工業高等学校教諭	熊谷文宏
東京都立八王子 工業高等学校教諭	高野雄三郎
元東京東立蔵前 工業高等学校教諭	寺井正一

目　次

第1章　電子と電子管

第2章　半導体素子

第3章 電 子 回 路

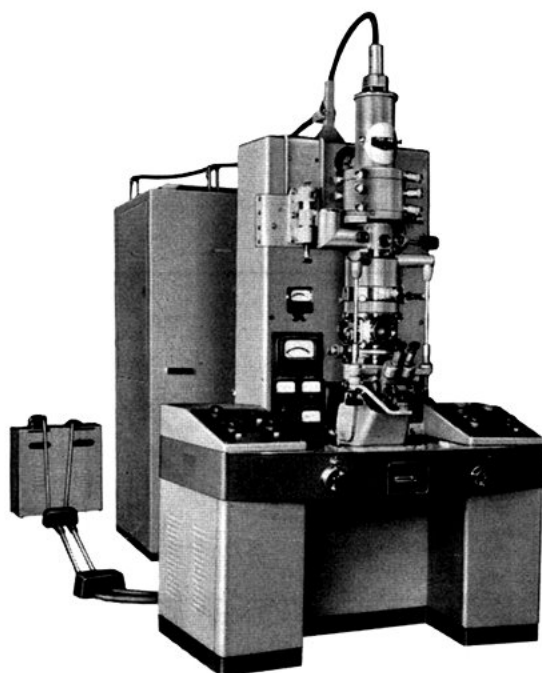
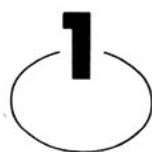
第4章　電　気　通　信

第5章　テレビジョン

第1章
電子と電子管

電子回路に用いられるトランジスタや，テレビジョンに用いるブラウン管などの電子管は，電子の働きを積極的に利用した回路素子である。

この章では，真空中での電子の性質とその働きについて調べる。

電子顕微鏡

真空中の電子

この節のねらい 電子は電荷をもった粒子の中で，最も軽く，原子を構成する基本的な粒子の一つである。

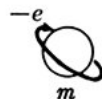
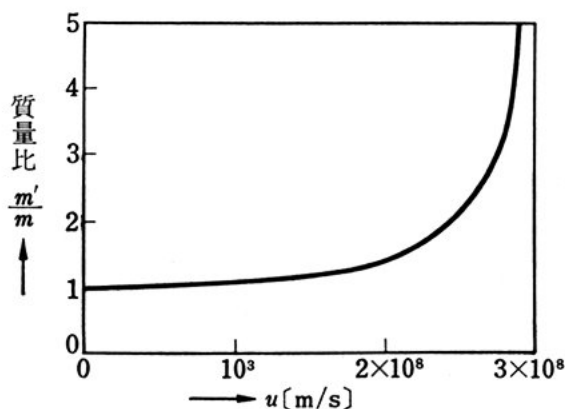
また，電子は，電界によって加速したり，電界・磁界によって運動の向きを変えることができる。この電子の運動を，ブラウン管に利用すると，目に見えない電圧や電流の波形が見られ，電子顕微鏡などにも利用されている。

1. 電子の性質と電子放出

(1) 電子の性質

電子の電荷 電子は負の電荷をもつ粒子で，その電荷の絶対値 $e=1.60\times10^{-19}$〔C〕は，これまでに知られている電荷の最小単位で，**電気素量**とよばれる。

電子の質量 アインシュタインの相対性理論によれば，静止している電子の質量と，運動しているときの質量とは異なる。電子の

図1 電子の性質

$m=9.11\times10^{-31}$〔kg〕

$e=1.60\times10^{-19}$〔C〕

静止質量を m〔kg〕とし，速さ u〔m/s〕で運動しているときの質量を m'〔kg〕とすると，$m=9.11\times10^{-31}$〔kg〕で，m' は次のようになる。

$$m'=\frac{m}{\sqrt{1-\left(\frac{u}{c}\right)^2}} \qquad (1)$$

5　上の式で，$c=3.00\times10^8$〔m/s〕で，光の速さである。例えば，$u=2.00\times10^8$〔m/s〕であれば，$m'=\frac{m}{\sqrt{1-\left(\frac{u}{c}\right)^2}}=1.34m$ となる。

図1に速さ u に対する質量比 $\frac{m'}{m}$ の変化を示す。

問 1. 電子の速さ u が光の速さ c に近づくと，電子の質量 m' はどうなるか。

10　### (2) 仕　事　関　数

金属内の電子のうち，ある電子は，特定の原子核に捕えられず，金属内をかなり自由に運動していると考えられる。これらの電子を**自由電子**という。この自由電子を取り出すには，あるエネルギーを与えなければならない。ある物質から，自由電子を真空中に取り出

15　すときに必要な仕事 W〔J〕を**仕事関数**という。

電子が1〔V〕の電圧で加速されて得るエネルギー 1.60×10^{-19}〔J〕を**1電子ボルト**（〔eV〕）という。電子ボルトは，電子だけでなく，陽子・原子・イオンなどの微粒子がもつような小さなエネルギーを表すのに便利な単位である。

20　仕事関数などのエネルギー W〔J〕を，$\phi=\frac{W}{e}$ を用いて，ϕ〔V〕の電圧または ϕ〔eV〕のエネルギーという。

問 2. $\phi=2$〔eV〕の仕事関数は何ジュールか。

(3) 光電子放出

金属や半導体にある波長より短い光を当てると，その表面から電子が放出される。このような現象を**光電子放出**，放出される電子を**光電子**という。図2(a)のようにして，陰極に光を当てて放出される光電子を陽極に集めると，陽極には矢印の向きに電流が流れる。光の波長 λ〔m〕が，物質によって決まる**限界波長** λ_c〔m〕より長いときは，光電子は放出されない。光の波長 λ ($\lambda<\lambda_c$) を一定とすると，光の強さが強いほど光電子の数は多くなる。光の強さを一定にして波長を変えると，図(b)のように，波長が短いほど（あるいは周波数 f が高いほど）光電子は大きな運動エネルギーをもつ。

光電子放出の限界波長 λ_c〔m〕と仕事関数 ϕ〔eV〕との間には，次の関係がある。

$$\lambda_c=\frac{hc}{e\phi}=\frac{1.24\times10^{-6}}{\phi} \qquad (2)$$

上式で，h は**プランクの定数**とよばれ，6.63×10^{-34}〔J·s〕の値をもつ。

表1に，いろいろな金属の ϕ の値を示す。

問 3. 表1の ϕ の値から，それぞれの金属の限界波長 λ_c を求めよ。

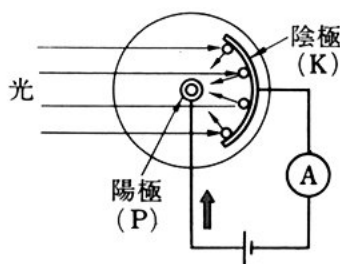



図2　光電子放出

(a) 原理図　(b)

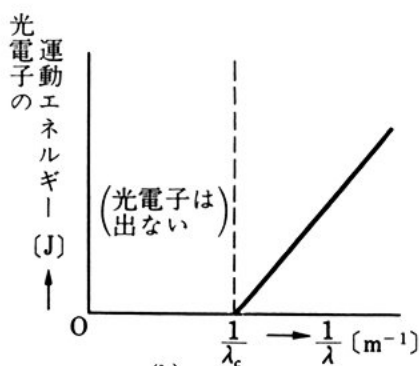



表1 仕事関数

金属		ϕ〔eV〕		A 〔A/(m²·K²)〕
		λ_cから	熱電子放出から	
セシウム	(Cs)	1.9	1.81	162×10^4
モリブデン	(Mo)	4.15	4.15	55×10^4
タングステン	(W)	4.54	4.54	$(60\sim100)\times10^4$
ニッケル	(Ni)	5.01	5.03	60×10^4
パラジウム	(Pd)	4.97	4.99	60×10^4
バリウム	(Ba)	—	2.11	60×10^4

(黒沢達美「物性論」による)

(4) 熱電子放出

金属の絶対温度 T〔K〕を高くすると，自由電子の運動エネルギーが増加して金属から電子が放出される。この現象を**熱電子放出**といい，放出される電子を**熱電子**という。金属の単位表面積から放出される熱電子流 I_s〔A/m²〕は，ε (=2.71828) を自然対数の底とすると，次の式で与えられる。

$$I_s = AT^2\varepsilon^{-\frac{b_0}{T}} \qquad (3)$$

ここで，$k=1.38\times10^{-23}$〔J/K〕(**ボルツマン定数**) とすると，$b_0=\dfrac{e\phi}{k}=11600\,\phi$〔K〕で，$A$ は物質の種類とその表面状態で決まる比例定数である。表1に，いろいろな金属の A の値を示す。

(5) 電界放出

金属表面に 10^8〔V/m〕程度の強い電界を加えると，常温でも金属表面から電子が放出される。この現象を**電界放出**という。これは，外部電界によって仕事関数が減り，電子が外部へ出やすくなるためである。

(6) 二次電子放出

金属や半導体に適当なエネルギーをもった電子を衝突させると，

その表面から新たな電子が放出される。この現象を**二次電子放出**といい，放出される電子を**二次電子**という。

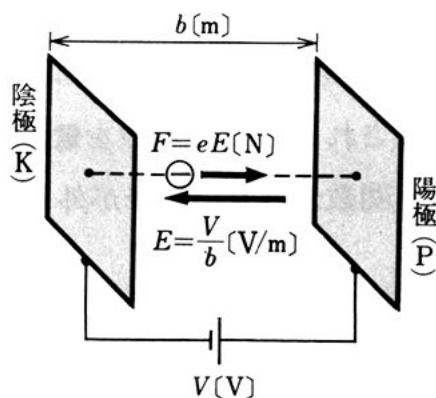
2　真空中の電子の運動

（1）電子の加速運動

図3のように，間隔 b〔m〕の平行平板電極間に電圧 V〔V〕を加えると，一様な電界の強さ $E=\dfrac{V}{b}$〔V/m〕が生じ，この電界内の電子には，$F=eE=\dfrac{eV}{b}$〔N〕の力が働く。電子の質量を m〔kg〕とすると，電子は電界と逆向きに，$a=\dfrac{eE}{m}$〔m/s²〕の加速度を受ける。陰極Kの表面での電子の初速度を u_0〔m/s〕とすると，t〔s〕後の速度 u〔m/s〕は，$u=u_0+at$ である。u_0〔m/s〕が0なら，t〔s〕間に電子の進む距離 x〔m〕は，次のようになる。

$$x=\frac{1}{2}at^2=\frac{eEt^2}{2m} \qquad (4)$$

したがって，x〔m〕だけ進むのに要する時間 t〔s〕は，次のようになる。

図3　電界による電子の加速

$$t=\sqrt{\frac{2mx}{eE}} \qquad (5)$$

例えば，$x=0.01$〔m〕，$E=1000$〔V/m〕ならば，$a=1.75\times10^{14}$〔m/s²〕，$t=1.07\times10^{-8}$〔s〕である。

（2） 電子の静電エネルギーと運動エネルギー

5　図3で，陰極Kにある速度0の電子は，陽極Pと陰極Kの間の電界の強さE〔V/m〕によって加速され，陽極に向かう。陽極に到達したときの電子の速度をu_1〔m/s〕とすると，このとき電子のもつ運動エネルギーは$\frac{1}{2}mu_1^2$〔J〕である。また，この期間に電界が電子に対して行った仕事はeV〔J〕である。電子は，電界から受け
10　たこの仕事によって，運動エネルギーを得たのであるから，エネルギー保存の法則から，

$$\frac{1}{2}mu_1^2=eV \qquad (6)$$

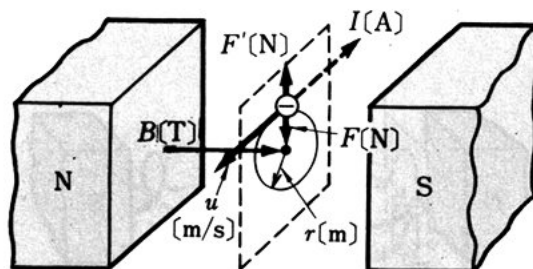
したがって，陽極での速度u_1〔m/s〕の値は，次のようになる。

$$u_1=\sqrt{\frac{2eV}{m}}=5.93\times10^5\sqrt{V} \qquad (7)$$

15　**問 4.**　式（7）で，$V=10^4$〔V〕のとき，電子の速度u_1はどれだけか。

（3） 電子の円運動

図4のように，速度u〔m/s〕の電子が，これと垂直な磁界の中

図 4　磁界中の電子の円運動

に入ると，電子の運動と逆向きに電流が流れていることになるから，フレミングの左手の法則に従って，電磁力が電子に働く。磁界の磁束密度を B〔T〕とすると，電子に働く力 F〔N〕は，u にも B にも垂直で，次のようになる。

$$F=euB \qquad (8)$$

u の大きさは変わらないから，この力 F によって電子は等速円運動をする。これを**サイクロトロン運動**という。

円運動の半径　図4で，電子の円運動の半径を r〔m〕とすると，遠心力 $F'=\frac{mu^2}{r}$〔N〕と電磁力 F〔N〕とがつりあっているはずであるから，次の式がなりたつ。

$$\frac{mu^2}{r}=euB$$

これから，r〔m〕は次のようになる。

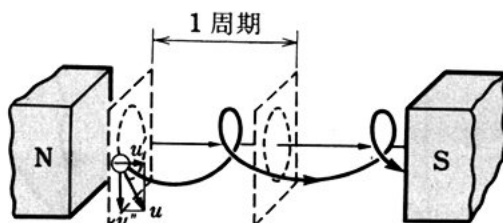
$$r=\frac{mu}{eB} \qquad (9)$$

周　期　円運動の周期を T〔s〕とすると，次の式がなりたつ。

$$T=\frac{2\pi r}{u}=\frac{2\pi m}{eB} \qquad (10)$$

例えば，$B=0.01$〔T〕，$u=2\times10^6$〔m/s〕とすると，$r=1.14\times10^{-3}$〔m〕，$T=3.58\times10^{-9}$〔s〕となる。

らせん運動　電子が磁界方向に速度成分 u' をもつと，図5のように，磁界方向には等速で直線運動を続けるから，電子の軌道は

図5　らせん運動

らせん状となる。

問5. 電子は，図5のように，一様な磁界中で定点を出発するときの初速度の方向や大きさによって，いろいろならせん運動をする。しかし，磁界方向の成分 u'〔m/s〕が一定ならば，電子は1周期の後に同じ点に集まることを示せ。

問　　題

1. p.7の式（5）と $u=at$ を用いて，静電エネルギーと運動エネルギーとの和は一定となることを示せ。

2. 電子の速さ u〔m/s〕が光の速さの $\frac{1}{3}$ となるために必要な加速電圧は何ボルトか。

3. 電子の速さが光の速さの $\frac{1}{3}$ のとき，磁束密度 $B=1$〔T〕の磁界内の電子の円運動の周期はいくらか。

4. 次の用語を説明せよ。

(1) 仕事関数　(2) 電界放出

(3) 電子ボルト　(4) サイクロトロン運動

電　子　管

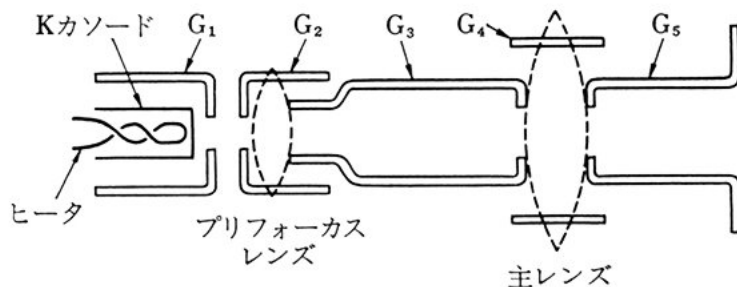
この節のねらい　真空管やブラウン管などは**電子管**とよばれる。真空管は陰極から放出される電子流を電界や磁界で制御して，電子流のいろいろな働きを利用する素子である。陰極と陽極からなる真空管を二極管という。それに電子の流れを制御する格子（こうし）電極をそれぞれ一つ，二つ，三つと加えた真空管を三極管，四極管，五極管という。電子流が高速に偏向できることを利用したテレビジョンの撮像管や，電子流がけい光物質を発光させることを利用したブラウン管などがある。

ここでは，真空管の電子流が電圧で変わる特性や，電子ビームとよばれる細い電子流を利用した**電子線管**の特性を調べる。

1. 真空管の電圧－電流特性

(1) 電　子　銃

図1は，ブラウン管の電子流を発生する**電子銃**の構造を示す。真空管の電極は，ガラスまたは金属の容器に封じてあり，内部は10^{-4}～10^{-6}〔Pa〕* 以下の真空になっている。電子流を取り出すためには，

図1　電子銃の構造

* 真空度を表すのにも圧力の単位**パスカル**〔Pa〕が用いられる。

熱電子を放出する陰極のほか，電子を加速するよう正電圧の加えられた電極 G_2～G_5（**陽極**あるいは**加速電極**）や，電子流を制御するため負電圧の加わった電極 G_1（**制御格子**）がある。これらの電極は，ニッケル・モリブデンなどで作られている。

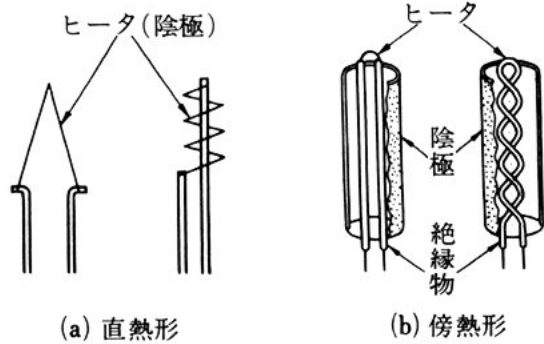



図2 陰極の構造

陰極には，図2(a)に示すように，熱電子を放出させる金属をフィラメントにして，これに電流を直接流して加熱する**直熱形陰極**と，図(b)のように，陰極とこれを加熱するヒータとを電気的に絶縁した**傍熱形陰極**とがある。陰極の材料には，タングステンなど高温に耐える金属を白熱させて，高温で熱電子を放出させるものもあるが，多くは低い温度でも熱電子放出のよいエミッタ材料，例えば，バリウムなどの金属酸化物を陰極の金属表面に塗布したものなどが使用される。

（2） 二極管の特性

陰極から放出された電子は，陽極で加速されて電子流になる。このしくみを，図3(a)に示すような，陰極と陽極とが対向した簡単な構造の二極管で考えよう。

図(a)のように，電圧を加え，ヒータ電源 V_A を調整して陰極の温度を T_1〔K〕にして，V_a を大きくしていくと，I_a は最初増加するが，図(b)の曲線 T_1 で示すように，ある大きさで頭打ちになってしまう。また，陰極の温度を T_2 に上げて，V_a と I_a との関係を調べると，曲線 T_2 の特性となる。この図で，V_a を大きくすると，I_a

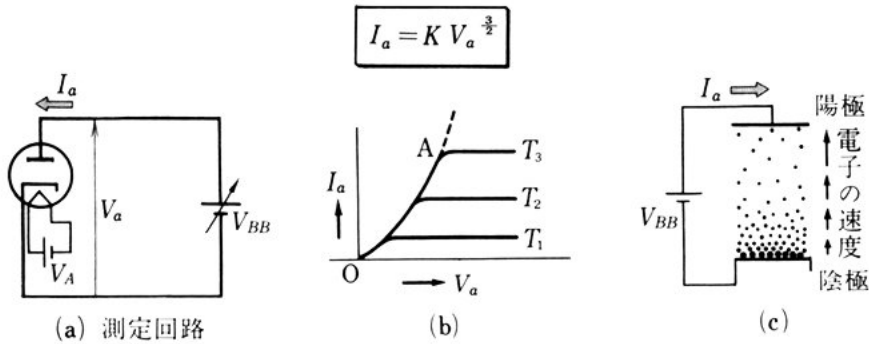



図 3　二極管の整流作用と特性

が増加する曲線 OA の部分を**空間電荷領域**といい，V_a の大きさに関係なく，陰極の温度で I_a が決まる範囲を**飽和領域**という。

空間電荷領域　陰極から放出された電子は，前節で学んだように，陰極の温度が高くなると増加する。しかし，電子どうしは，どちらも負電荷であるから，互いに反発し合って，それ以上の電子が放出されることを妨げる。このように，空間に分布している電子の電荷を**空間電荷**（space charge）という。陽極電圧 V_a で I_a が流れている二極管の電子の密度は，図 3 (c) に示すように，陰極付近は密で，陽極付近は疎であるように分布し，電子は陽極に向かって運動し，陰極から次々に電子が出るので，この分布は変わらない。陽極に到達する電子の数は，電子の密度（V_a に比例する）と走行速度（$\sqrt{V_a}$ に比例する）との積に比例する。このため，陰極からじゅうぶん電子が放出されても，陽極電流は空間電荷の分布の形で制限され，

$$I_a=KV_a\sqrt{V_a}=KV_a^{\frac{3}{2}} \qquad (1)$$

で与えられ，**空間電荷制限電流**とよばれる。K は電極の形・寸法で決まる定数である。式（1）は $\frac{3}{2}$ **乗法則**とよばれる。実際の真空管では，電子が陰極を飛び出すとき，初速度をもっているので，電流はこの式からわずかにずれている。

飽和領域　陰極の温度が低く，電子の放出が少ない場合は，V_a を大きくすれば，陽極が電子を引き寄せる力は強く，空間電荷の影響は小さいので，陰極から放出された電子は，全部陽極に引き寄せられる。したがって，V_a をさらに大きくしても，I_a は陰極から放出できる電子数以上には増加しない。この状態の電流を二極管の**飽和電流**という。

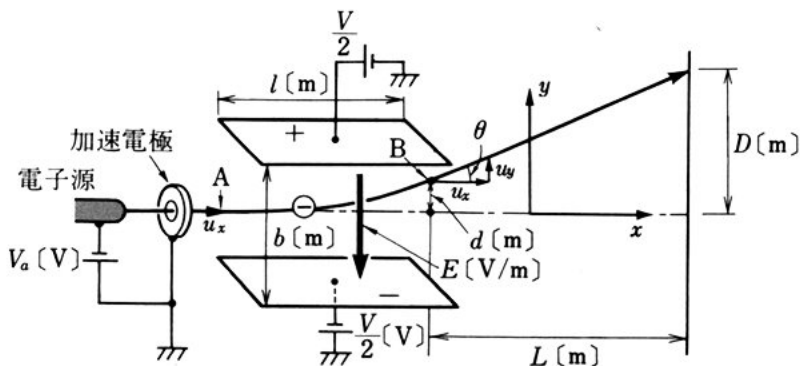
真空管は，ふつう空間電荷制限電流で用いられる。

問 1. 空間電荷領域で，$V_a=20$〔V〕のとき，$I_a=100$〔mA〕であったという。$V_a=25$〔V〕のとき，I_a はいくらになるか。

2. 電　子　線　管

(1)　電界による電子の偏向

図4は，ブラウン管などに用いられている電界による電子の偏向の原理を示す図である。いま，間隔 b〔m〕，長さ l〔m〕の平行平板電極に電圧（偏向電圧）V〔V〕を加え，加速電圧 V_a〔V〕で加速された電子を1個だけ x 軸の向きに入射させた場合を考える。電子は，電極間に働く y 軸の負の向きの電界の強さ $E\left(=\dfrac{V}{b}\right)$〔V/m〕によって y 軸の正の向きに加速され，図のAB間では放物線をえがき，

図 4　電界による電子の偏向

電極を出ると直線運動をする。このように，電子の運動の向きが曲げられることを**偏向**という。x 軸の向きの電子の速度 u_x〔m/s〕は一定であるから，長さ l〔m〕の電極を通過する時間 t〔s〕は，$t=\dfrac{l}{u_x}$ である。p.6の式（4）を用いると，電極を出たところでの偏向距離 d〔m〕は，次の式で与えられる。

$$d=\frac{1}{2}at^2=\frac{eVt^2}{2mb}=\frac{eVl^2}{2mu_x^2b} \qquad (1)$$

p.7の式（6）と同様な関係 $eV_a=\dfrac{m}{2}u_x^2$ を上式に代入すると，

$$d=\frac{Vl^2}{4V_ab} \qquad (2)$$

という関係がなりたつ。

偏向角度　図4の点Bでの偏向した角度を θ とすると，$\tan\theta$ は，この点での y 軸の向きの速度 u_y と，x 軸の向きの速度 u_x との比に等しい。

$$\tan\theta=\frac{u_y}{u_x}=\frac{at}{u_x}=\frac{eVl}{mu_x^2b}=\frac{Vl}{2V_ab} \qquad (3)$$

偏向距離　図4のように，電極を出て θ だけ偏向された電子が直線運動して，L〔m〕だけ離れた面に当たると，その面での偏向距離 D〔m〕は，次の式で与えられる。

$$D=d+L\tan\theta=\frac{Vl^2}{4V_ab}+\frac{LVl}{2V_ab}=\frac{Vl}{2V_ab}\left(L+\frac{l}{2}\right) \qquad (4)$$

例えば，$V_a=10^3$〔V〕，$V=100$〔V〕，$b=0.01$〔m〕，$l=0.02$〔m〕，$L=0.2$〔m〕とすると，$d=0.001$〔m〕，$\tan\theta=0.1$ となり，式（4）から $D=0.02$〔m〕となる。

（2）磁界による電子の偏向

図5のように，加速電圧 V_a〔V〕によって，速度 u_x〔m/s〕まで加速された電子が，紙面に垂直な向きに働く一様な磁束密度 B〔T〕

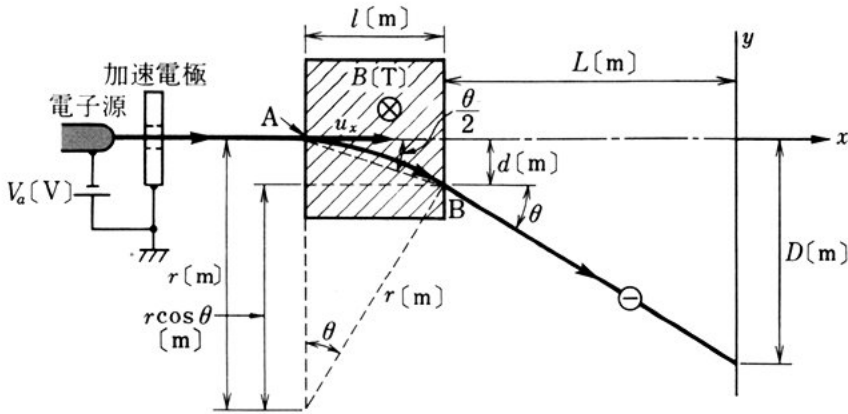



図 5　磁界による電子の偏向

の磁界内を，x 軸の向きの長さ l〔m〕だけ通過する場合を考える。磁界内では，電子は AB のように p. 8 の式（9）の半径 r〔m〕をもつ円弧をえがき，磁界を出ると再び直線運動をする。磁界を出たところでの偏向角度 θ と偏向距離 d〔m〕は，r が l より非常に大きいとき，次の式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned}\tan\theta &= \frac{l}{r\cos\theta} = \frac{l}{\sqrt{r^2-l^2}} \fallingdotseq \frac{l}{r}\\ d &= l\tan\frac{\theta}{2} \fallingdotseq l\frac{\tan\theta}{2} \fallingdotseq \frac{l^2}{2r} = \frac{eBl^2}{2mu_x}\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

磁界を出てから L〔m〕だけ離れた面での偏向距離 D〔m〕は，次の式で与えられる。

$$D = d + L\tan\theta \fallingdotseq \frac{eBl}{mu_x}\left(L+\frac{l}{2}\right) = \sqrt{\frac{e}{2mV_a}}\,Bl\left(L+\frac{l}{2}\right) \quad (6)$$

（3）　一様でない電界と磁界による電子の偏向

図 6 (a) に示したように，電気力線と平行でない向きの速度成分をもつ電子は，曲線 ABCDE に沿ってしだいに電気力線に平行になるような運動をする。そこで，図 (b) のように，電気力線が 1 点に集まるように，電極の形を工夫すると，電子は陰極面内で図の R, L

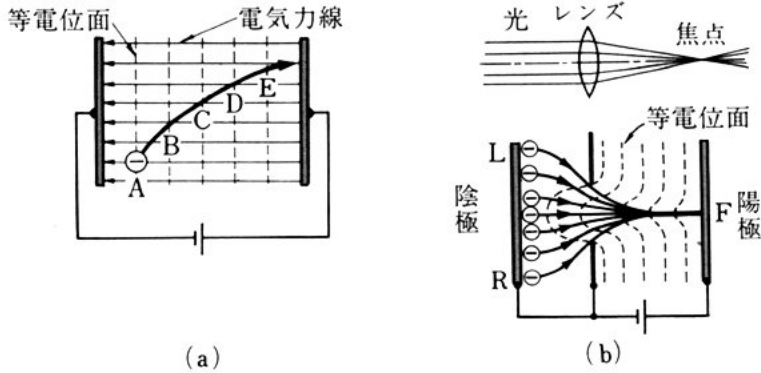



図6　電子の集束

の間のどこから出ても，陽極面の点Fに集まるように運動する。このような電極は，ちょうどレンズが光を集めるように，電子を集めるので**静電レンズ**とよばれる。

同様に，磁界の電磁力によって電子を集める**電磁レンズ**もある。これらは，テレビジョンの撮像管・受像管や電子顕微鏡に応用されている。また，このように電子が集められて，細い流れになったものを**電子ビーム**という。

問　　題

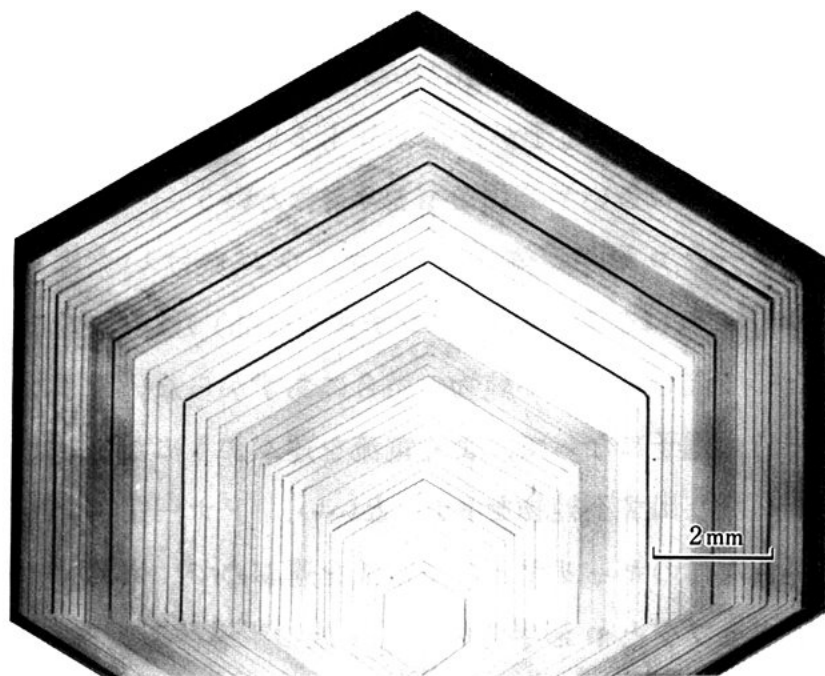
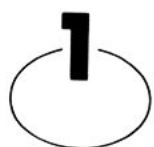
1. 真空管は，ふつう空間電荷領域で使用される。なぜか。
2. 制御格子の電圧は，負の範囲で使用される。なぜか。
3. 二極管の飽和領域は，何によって定まるか。
4. 図5で，加速電圧 V_a〔V〕，電極の長さ l〔m〕，電極から面までの距離 L〔m〕が，p. 13の図4の電界による電子の偏向の例（p. 14の18～20行）と同じとし，$B=0.002$〔T〕としたときの D〔m〕を求め，電界による偏向のときと比べてみよ。
5. 次の用語を説明せよ。
   (1) 空間電荷制限電流　(2) 傍熱形陰極　(3) 偏向角度
   (4) $\frac{3}{2}$乗法則　(5) 電磁レンズ

第2章 半導体素子

ゲルマニウムダイオード・シリコンダイオード・シリコントランジスタなどは,半導体の結晶からできており,半導体素子とよばれる。

半導体の単結晶中のキャリヤの運動は,真空中の電子流と同じように,外部からの電圧や電流で制御することができる。このことが,電子回路の整流や増幅の働きに利用される。

この章では,このような半導体素子の原理・構造・特性について調べる。

けい素の結晶

1 ダイオード

この節のねらい　半導体の pn 接合は，半導体素子を構成するうえで基礎になる。この節では，半導体の特性と pn 接合の基本的特性を学び，ダイオードとしての応用を調べる。

1. 半導体とその性質

(1) 半　導　体

けい素やゲルマニウムの結晶は，常温でもわずかに電流を流す性質があり，温度が変わったり，わずかに不純物を含んでも，その導電率が大きく変わる性質がある。このような物質を**半導体**という。半導体がこのような性質をもっているのは，半導体には電流を運ぶ**キャリヤ** (carrier) があるからである。キャリヤには，負電荷を運ぶ電子と，正電荷を運ぶ正孔とがある。電子と正孔の数が等しい半導体を**真性半導体**，電子が正孔よりも多い半導体を **n 形半導体**，電子よりも正孔の多い半導体を **p 形半導体**という。

ドナーと n 形半導体　ゲルマニウムやけい素は4族の原子であり，これにひ素 (As)・アンチモン (Sb) など5族の原子を不純物として混ぜると，不純物の結合にあずからない電子は，常温ですべて自由電子になって，よく電流を運ぶようになる。このように，電子を作り出す不純物を**ドナー**といい，ドナーを含む半導体は，電子が負電荷のキャリヤとして電流を運ぶので，n 形半導体である。

アクセプタと p 形半導体　4族の半導体にガリウム (Ga)・インジウム (In)・ほう素 (B) など3族の原子を不純物として混ぜる

と，結晶の結合に必要な電子が不足する。この電子が不足した状態は，不純物の他の原子から容易に電子を受け，電子の不足の状態が動くようになる。この状態の動き方は，正電荷のキャリヤが自由に動くのと同じになるので**正孔**とよばれる。正孔を作り出す不純物を**アクセプタ**といい，アクセプタを含む半導体は，正孔が正電荷のキャリヤとして電流を運ぶので，p 形半導体である。

問 1. 真性半導体と p 形半導体および n 形半導体はどう違うか。

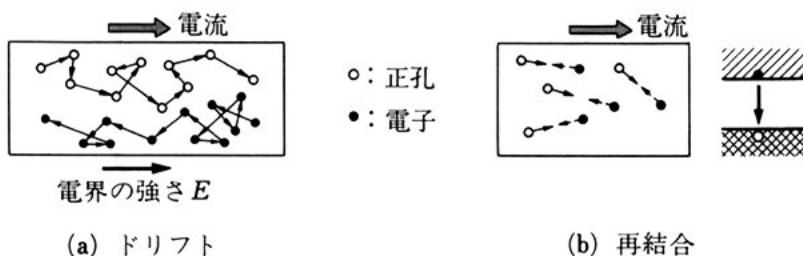
（2） 半導体を流れる電流

半導体中をキャリヤが移動することによって，電流が流れる。キャリヤが移動する原因にはいくつかある。

図 1 (a) のように，半導体に一定の向きに強さ E の電界を加えると，正または負の電荷をもっている正孔または電子は，電界から力を受けて，μE の速さで，それぞれ電界の向き，またはその逆向きに移動する。μ をそのキャリヤの**移動度**という。このため，電界の向きに電流が流れる。この現象を**ドリフト** (drift) といい，このようにして流れる電流を**ドリフト電流**という。この電流の大きさは，電界の強さに比例する。

半導体内でキャリヤの濃度に変動があると，気体中の分子と同じように，キャリヤは，濃度の大きい部分から小さい部分に向かって移

図 1 半導体内のキャリヤの移動と電流

(a) ドリフト　　(b) 再結合

動する。この現象を**拡散**（diffusion）といい，こうして流れる電流を**拡散電流**という。拡散電流の大きさは，濃度の傾きに比例する。

問 2. 半導体を流れるドリフト電流と拡散電流とはどう違うか。

2. pn 接合とその性質

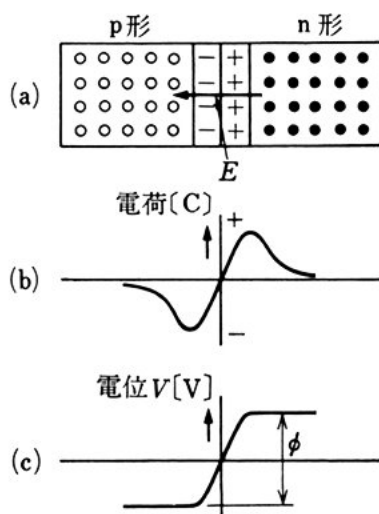
(1) p n 接 合

半導体の単結晶の一部をp形，他をn形としたものを**pn 接合**といい，両領域の接している面を**接合面**という。

空乏層　pn 接合ができると，n 形領域の電子はp形領域へ，p形領域の正孔はn形領域へ拡散し，それぞれ正孔または電子と再結合して消滅する。このため，p形領域の接合面に近い部分は，正孔が減少して負の電荷が生じ，n形領域の接合面に近い部分では，電子が減少して正の電荷が生ずる（図2(b)）。すなわち，p形・n形領域のこの部分では，それぞれキャリヤがなくなっている。このキャリヤのなくなっている部分を**空乏層**という。このとき，p形領域の電位はn形領域より低くなり，電位分布は図(c)のようになる。

図2　p n 接 合

電荷の分布と電位

外部から電圧を加えない場合，n形領域に多数ある電子は，この電位の障壁に逆らって，p形領域に拡散するが，一方，p形領域の数の少ない電子は，n形領域に電

界によってドリフトする。この両者の数が等しい状態で平衡し，電子による電流はない。

また，p 形領域に多数ある正孔は，正孔密度の小さい n 形領域に，電位の障壁に逆らって拡散するが，n 形領域の正孔は，電界によってドリフトする。平衡状態では，この両者の数は等しく，電流は流れない。

このように，外部から電圧を加えなければ，電流は流れない。

（2） 整流特性と接合容量

外部から p 形領域を正にするような電圧（順方向電圧）V を加えると，接合部の電位障壁が低くなり，p 形領域と n 形領域との電位差が減少するので，電圧を加えないときより，多くの電子が n 形領域から p 形領域へ，より多くの正孔が p 形領域から n 形領域へ流れ込む。これをそれぞれの**キャリヤの注入**という。注入されたキャリヤは，その領域ではもともと少数であったから**少数キャリヤ**，その領域にもとから多かったキャリヤを**多数キャリヤ**という。

少数キャリヤは，多数キャリヤと再結合して消滅するため，接合部から離れるに従って減少する。しかし，p 形領域から電池の正極へ電子が流れ出し，p 形領域に正孔を生ずることになり，p 形領域の正孔を補充する。また，n 形領域へは電池の負極から電子が流れ込んで，n 形領域の電子を補充する。このため，回路に電流（順方向電流）が流れ続ける。

前と逆向きの電圧（逆方向電圧）を加えると，p 形領域と n 形領域の間の電位差が大きくなり，空乏層の幅が広がる。このため，n 形領域から p 形領域への電子の流れ，p 形領域から n 形領域への正孔の流れはきわめて少なくなる。したがって，p 形領域から n 形領域への電子の流れ，n 形領域から p 形領域への正孔の流れによっ

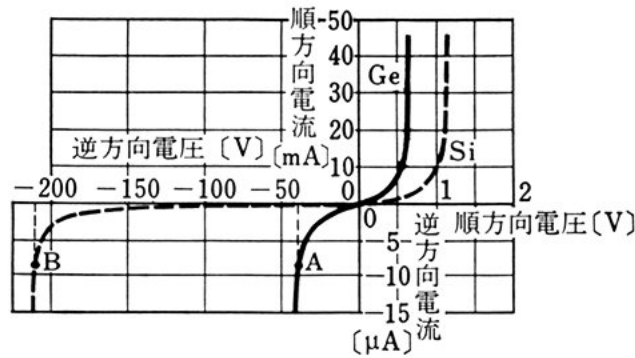



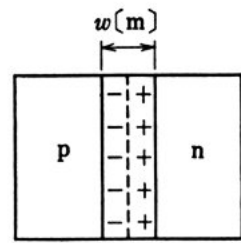
図3　ダイオードの整流特性

て，わずかに電流（逆方向電流）がn形領域からp形領域に流れるだけである。このように，一方の向きにだけ電流が流れやすい性質を**整流特性**といい，この特性は**pn接合ダイオード**（または**ダイオード**）として用いられる。

図3に，ゲルマニウムダイオードおよびシリコンダイオードの特性を示す。この例では，ゲルマニウムダイオードで20〔mA〕の順方向電流を流すには，約0.6〔V〕の順方向電圧でよいが，シリコンダイオードでは，約1.1〔V〕を要する。一般に，逆方向電流は，シリコンダイオードの方が非常に少ない。

飽和電流　逆方向電圧を加えた場合は，空乏層に流れ込む正孔や電子はないが，常温でも熱エネルギーをもらった自由電子が多少あり，同時に正孔ができ，両者がキャリヤとなって，わずかながら電流を運ぶ。この逆方向電流は，pn接合の**飽和電流**とよばれ，この値は，温度によって敏感に変化する。

図4　接合容量

接合容量　図4のように，空乏層は幅 w のほとんど絶縁体に近い領域で，その両側には正負の電荷が

たまっているから，一種のコンデンサになっている。これを**接合容量**といい，w に反比例する。逆方向電圧によって空乏層の幅が変化する特性は，可変容量ダイオードに用いられる。

問 3. pn 接合の整流のしくみを説明せよ。

5 **(3) 降伏現象**

図3において，ゲルマニウムダイオードやシリコンダイオードの逆方向電圧が，それぞれ A 点，B 点の大きさになると，急に大電流が逆方向に流れ始める。これは，接合が破壊したのではなく，再び電圧を小さくすれば電流も 0 に近づく。この現象を pn 接合の**降**
10 **伏現象**といい，電流の増え始める A 点または B 点の電圧を**降伏電圧**という。

電子なだれとツェナ効果 逆方向電圧が大きくなると，空乏層に残っているわずかのキャリヤは，この領域に加わっている強い電界によって加速され，大きな運動エネルギーをもつようになる。こ
15 のエネルギーの値がある程度大きくなると，自由電子と正孔を作り出し，これがさらに加速されて，電子と正孔の対(つい)を作ることを繰り返し，電流はなだれのように増加する。これを**電子なだれ**という。

pn 接合に逆方向電圧を加えると，p 形領域の電子は，空乏層が薄いと空乏層を突き抜けて n 形領域に流れ込むようになる。この
20 電流を**トンネル電流**といい，この現象を**ツェナ効果**という。

不純物の多い pn 接合では空乏層が薄くなり，逆方向電圧を加えたとき強い電界が生じ，数ボルトの低い逆方向電圧でもツェナ効果で降伏現象が起こり，不純物が少なくなると，主として電子なだれで降伏現象が起こるようになる。

3. ダイオードとその特性

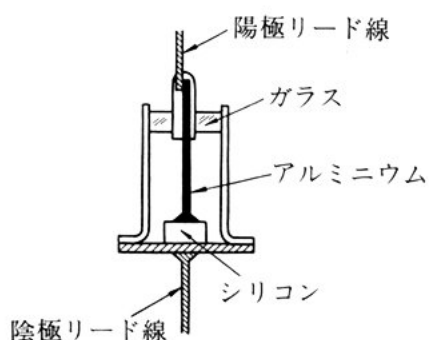
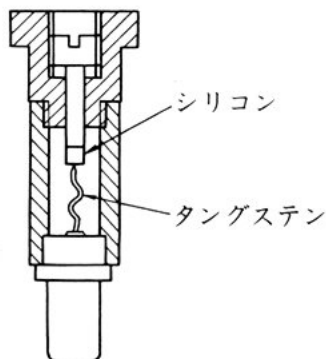
(1) ダイオードの構造と蓄積作用

半導体ダイオードは，前に学んだように整流特性をもつが，構造的には接合ダイオードと点接触ダイオードに大別される。

接合ダイオード　一つの半導体結晶の中で，p 形領域と n 形領域が接した，いわゆる pn 接合をもつダイオードを**接合ダイオード**という。

接合を作るには，n 形シリコンに p 形半導体を作るような材料，例えば，アルミニウムを合金させて作る図 5(a) の**合金接合法**や，あるいは n 形シリコンの結晶を切り出し，その上にアルミニウムを拡散させる**拡散接合法**などがある。現在は，拡散接合法によるものが多く用いられている。

点接触ダイオード　図 5(b) のように，n 形シリコンの薄い単結晶に金属針を立てると，前に学んだような接合は作っていないが，金属針とシリコンの接点付近に，接合に近い働きをする部分ができ，点接触ダイオードとなる。

図 5 ダイオード

(a) 接合ダイオード

(b) 点接触ダイオード

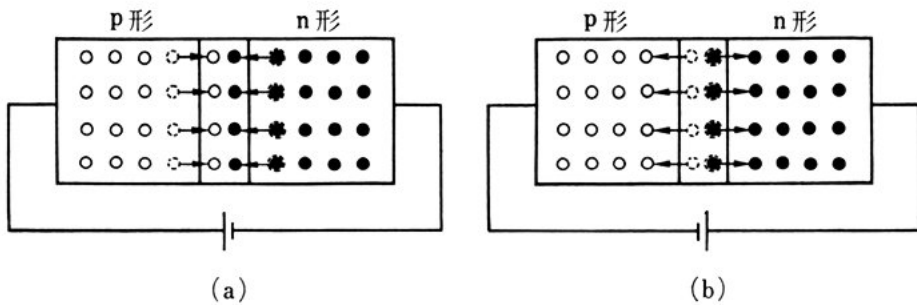



図 6　ダイオードの蓄積作用

このダイオードは，大電流を流せず，特性がやや不安定であるなどの欠点があるが，接点が小さく，素子のもつ静電容量を小さくできるので，マイクロ波領域などで用いられる。

蓄積作用　ダイオードに順方向電圧を加えたとき，正孔や電子は図 6(a)のように空乏層に流れ込む。次に，ダイオードに加える電圧を急激に逆方向に切り換えると，図 6(b)のように，それまで空乏層にあった正孔や電子が電圧によってはき出されるため，しばらくの間大きな逆方向電流が流れる。正孔や電子が空乏層になくなると電流は小さくなる。この現象を正孔や電子の**蓄積作用**といい，半導体のスイッチ作用を考えるとき重要である。

(2) ダイオードの定格

ダイオードを安全に用いるには，許容電力・電圧・電流・温度などの定格値を超えないようにしなければならない。

電圧の定格値には，逆方向電圧の最大値（**せん頭逆電圧**），電流の定格値には，**平均順方向電流**およびダイオードに流れる瞬間最大電流（**サージ電流**）が決められている。

これらの定格値は，ダイオードの周囲温度 T_a に影響される。ダイオードの接合部温度 T_j が，ふつう，ゲルマニウムダイオードで 75～80〔°C〕，シリコンダイオードで 150～175〔°C〕以上になると，そのダイオードは焼損してしまう。また，ダイオードは，温度が高

(a)

(b)

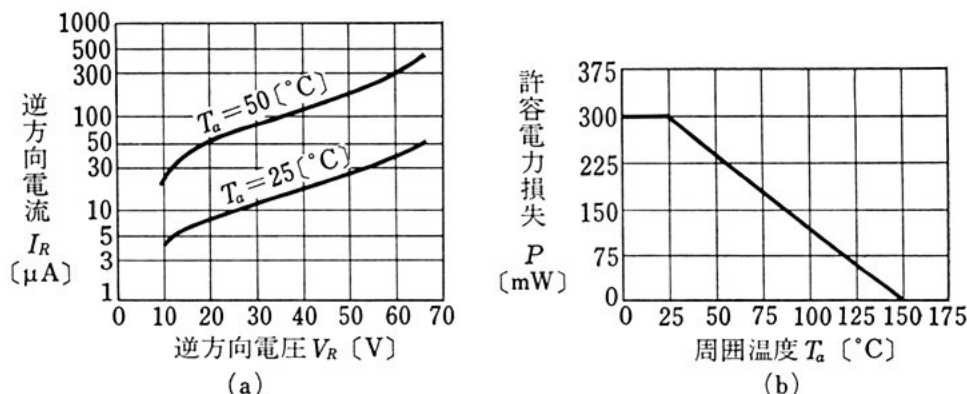



図 7　ダイオードの温度特性と許容電力損失

くなると，同じ電圧に対して順方向電流・逆方向電流とも増加する。例えば，シリコンダイオードでは，図 7 (a) のように，逆方向電流が温度 25〔°C〕の上昇に対して約 10 倍も増す。温度が上がって逆方向電流が増すと，その 2 乗に比例して発生する熱量が増すから，さらに温度が上昇する。したがって，ダイオードの定格は，周囲温度を指定して与えてある。周囲温度が上昇すると，ダイオードの許容電力損失は，図 (b) に示したように，常温の場合より小さくなる。

問 4.　図 7 (b) の T_a と P の関係が，このように定まる理由を考えよ。

4.　その他のダイオード

(1)　定電圧ダイオード

図 8 のように，ダイオードに加える逆方向電圧の値を大きくしていくと，降伏現象が起きる。この降伏電圧付近での電圧電流特性は，ほとんど電流軸に平行である。この状態では，ダイオードに流れる電流が変化しても電圧はほぼ一定に保たれる。この性質を利用して，所定の定電圧を得るように作られたダイオードを**定電圧ダイオード**

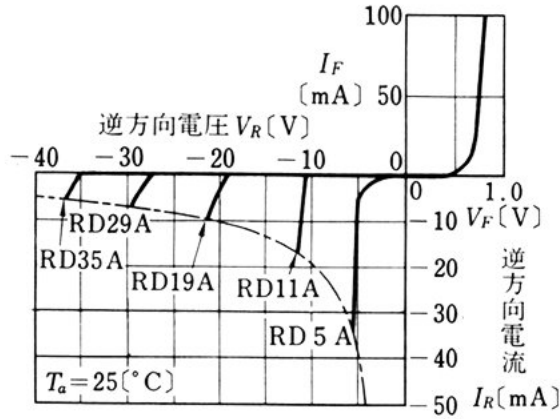



図 8 ダイオードの降伏特性

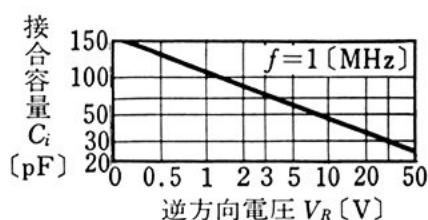
（ツェナダイオード）という。

降伏現象のある領域で，逆方向電流を $\varDelta I_R$ だけ増すと，逆方向電圧はわずかではあるが $\varDelta V_R$ だけ増加する。この増加分 $\varDelta V_R$ と $\varDelta I_R$ の比 $\dfrac{\varDelta V_R}{\varDelta I_R}$ を定電圧ダイオードの**動作抵抗**といい，r_d で表す。

定電圧ダイオードの電力損失は V_R と I_R の積で求められ，焼損しないための電力損失が決められている。この**許容電力損失**は，整流用ダイオードと同様に周囲温度 T_a が高いほど小さくなる。

問 5. 図8の I_R の最大値を結ぶ破線は，電力損失一定の線である。I_R の最大値は，V_R とどんな関係にあるか。

（2） 可変容量ダイオード

空乏層の接合容量が，逆方向電圧によって変化する性質を利用したダイオードを，**可変容量ダイオード**という。逆方向電圧と接合容量の関係の例を図9に示す。図(a)のダイオードは，電圧の大きさで静電容量を変化できる可変コンデンサとして使われ，図(b)のダイオードは，雑音の少ない増幅用の回路に用いられ，衛星通信などに実用されている。

(a) 可変容量用

(b) 増幅用

図 9　可変容量ダイオード

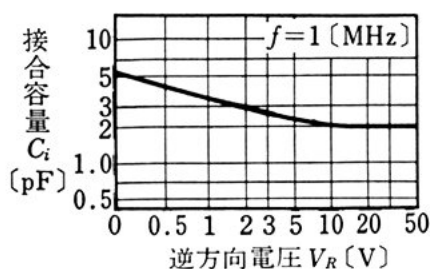
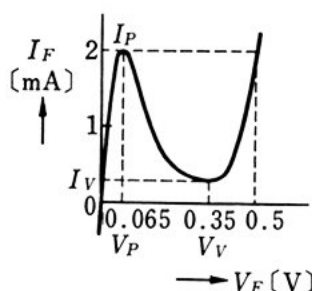
混乱のないときは◯を
省略してよい。

(a) 図記号

(b) 特　性

図 10　トンネルダイオード

(3)　トンネルダイオード

pn 接合の p 形領域および n 形領域の不純物濃度が増すと，空乏層の中に残される不純物イオンによる電荷が増すから，p 形領域と n 形領域の間の空乏層の厚さは小さくなる。また，p 形領域および n 形領域の不純物濃度が増すと，電子や正孔の数も増加し，低い順方向電圧で，空乏層を突き抜けて，トンネル電流が流れるようになる。このようなダイオードを**トンネルダイオード**（またはエサキダイオード）といい，図記号を図 10(a) に，特性の例を図 (b) に示す。順方向電圧 V_F が増すと，最初トンネル電流 I_F が増加して**せん頭点電圧** V_P で**せん頭点電流** I_P に達するが，やがて減少して**谷電圧** V_V で極小値 I_V となる。

V_P や V_V の値は，用いる半導体材料によって決まる。V_V 以上の

V_F では，ふつうのダイオードと同様の拡散電流が流れる。

V_P と V_V の間の電圧に対しては，V_F が増加したとき，I_F は減少する。すなわち，$G_t=\dfrac{\Delta I_F}{\Delta V_F}$ で定義されるコンダクタンスは負であって，これを**負性コンダクタンス**という。負性コンダクタンスは，発振器を作るときに大切な考え方である。トンネル電流には，拡散電流のような蓄積作用がないので，超高周波で簡単な発振器を作ることができる。

問　　題

1. キャリヤの移動度を μ〔m²/(V·s)〕とし，キャリヤの濃度を n〔個/m³〕とすると，金属や半導体の導電率 σ〔S/m〕は $\sigma=ne\mu$ として求められることを説明せよ。

2. n 形ゲルマニウムの導電率が 25〔S/m〕であるとき，キャリヤが電子だけとすると，電子の個数はどのくらいか。ただし，$\mu=0.38$〔m²/(V·s)〕とする。

3. 接合容量とは何か。pn 接合に逆方向電圧 V〔V〕を加えたとき，V の大きさを増すと，接合容量 C〔F〕はどうなるか。

4. ダイオードの蓄積作用とは何か。

5. ダイオードの定格とは何か。

6. 図 7 の特性図から，ダイオードの周囲温度 $T_a=75$〔°C〕のときの許容電力損失を求めよ。

7. ダイオードに関する次の用語を説明せよ。

(1) 飽和電流　(2) 降伏電圧　(3) 接合容量

(4) トンネル電流　(5) 逆方向電流

トランジスタ

この節のねらい　トランジスタは，電子回路や集積回路の能動機能の主役である。バイポーラ形とよばれる npn 形や pnp 形の三層構造のトランジスタのほかに，p 形領域や n 形領域など，一つの半導体を通路とする電界効果トランジスタがあり，ここでは，これらのトランジスタの動作原理と特性を調べる。

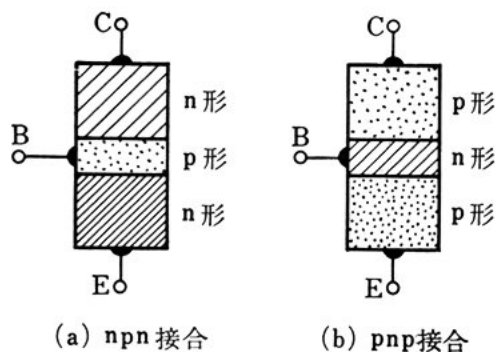
1．トランジスタの原理

（1）トランジスタの働き

構　造　トランジスタは，図 1 (a)，(b) のように，npn または pnp の三層構造となっている。これらをそれぞれ **npn 形・pnp 形の**トランジスタという。図 1 (a)，(b) で，中間にはさまれた p 形または n 形の部分は，厚さ数マイクロメートル程度でごく薄く，この部分を**ベース** (base) という。ベースと接合を作る二つの半導体の一方を**エミッタ** (emitter) といい，他方を**コレクタ** (collector) という。エミッタは，コレクタより不純物を数百倍も多く含んでいる。エミッタ (E)・ベース (B)・コレクタ (C) には，それぞれ電極がついている。

図 1　接合トランジスタ

(a) npn 接合　　(b) pnp 接合

トランジスタは，製法・構造によって合金形・拡散形に分けられる。**合金形**は，ベー

ス基板半導体の両面に不純物を合金接合して，エミッタおよびコレクタを形成させたものである。製法が簡単であるから，多量生産に適し，低周波用の安価なトランジスタとして用いられる。

拡散形は，さらにメサ形・プレーナ形・エピタキシャル形などに分けられる。**メサ形**は，コレクタ基板半導体を不純物蒸気中で熱し，不純物を基板中に拡散させてベースを形成させたものである。エミッタは，ベース層上にさらに拡散または合金法によって形成される。コレクタの面積を小さくできるので，高周波特性が優れている。

プレーナ形は，コレクタ基板半導体を酸素中で加熱して SiO_2 の膜を形成させ，この膜の一部を除き，この部分から不純物蒸気を拡散して，ベースおよびエミッタを形成させたものである（図2）。SiO_2 膜で外気から保護されているので，動作が安定で，微小信号用として優れている。

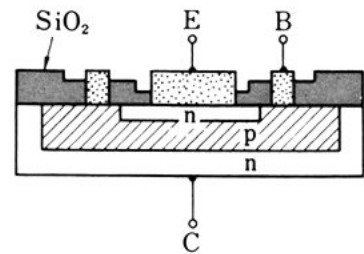



図 2　プレーナ形トランジスタ

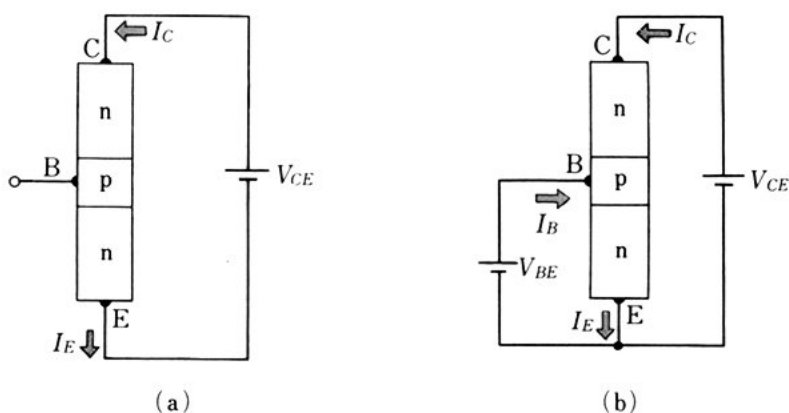
エピタキシャル形は，けい素の基板を $SiCl_4$ の蒸気中で加熱し，基板と同じ結晶構造をもった薄い層を形成させ，これをコレクタとしたもので，ベースおよびエミッタは，プレーナ形と同様にして形成させる。ほかの形のトランジスタでは，コレクタに高い電圧を加えるためには，これに耐えるようにコレクタの抵抗率を大きくしなくてはならない。このため，コレクタ・エミッタ間電圧が低い場合のコレクタの抵抗（コレクタ飽和抵抗）が大きくなって，トランジスタの動作が阻害されることがある。エピタキシャル形では，抵抗の小さい基板の上に，抵抗率の大きなエピタキシャル層をごく薄く形成させるので，コレクタ飽和抵抗が低く，しかもある程度のコレクタ

電圧を加えることができる。

働き トランジスタは，ベース・エミッタ間接合では順方向，コレクタ・ベース間接合では逆方向に電圧を加えて用いる。npn 形と pnp 形とでは，加える電圧の極性と流れる電流の向きが反対であるだけで，動作の原理は同じであるので，ここでは npn 形について説明する。

npn 形トランジスタに，図 3 (a) のように電源を接続すると，ベース・エミッタ間接合には順方向電圧が加わるが，コレクタ・ベース間接合には逆方向電圧が加わるので，コレクタからエミッタへ流れる電流は，ごくわずかである。

次に，図 (b) のように，ベース・エミッタ間に 1〔V〕以下の順方向電圧を加えると，エミッタ領域の多数キャリヤである電子は，正電位にあるベース領域に流れ込む。ベース領域は，前に学んだように厚さが非常に薄いので，エミッタから流れ込んだ電子の大部分は，ベース領域を通り抜けて，コレクタ領域に進む。コレクタ領域では，コレクタ電極側が正電位にあるので，エミッタからの電子はコレクタ電極に進み，図のようにコレクタ電流 I_C が，V_{CE} にはほとんど関係せずに流れる。

図 3 トランジスタの働き

エミッタから流れ込んだ電子のごく少数は，ベース領域で正孔と結合する。結合で消滅する正孔を補うだけのわずかな電流 I_B が，ベース電源 V_{BE} からベースに流れ込む。

いま，ベース・エミッタ間電圧（ベース電圧）V_{BE} をわずか変化させると，それに応じてベース電流 I_B とコレクタ電流 I_C はともに変化するが，コレクタ電流の変化は，ベース電流の変化より非常に大きい。このように，トランジスタは，ベース電流のわずかな変化によって，コレクタ電流を大きく変化させることができるので，トランジスタには，電流を増幅する作用がある。

ベース電流 I_B とコレクタ電流 I_C を加えたものが，エミッタ電流 I_E となるので，次の関係がなりたつ。

$$I_E = I_B + I_C \quad (1)$$

問 1. トランジスタで電流を増幅できる理由を説明せよ。

（2） トランジスタの電圧－電流特性

図 4 (a) の接続で，ベース電流 I_B をある一定値に保って，コレクタ・エミッタ間電圧（コレクタ電圧）V_{CE} を変化したとき，コレクタ電流 I_C の変化を測定すると，図 4 (b) のような曲線が得られる。それぞれの曲線は，ベース電流のそれぞれ異なった値に対応している。次に，コレクタ電圧 V_{CE} をある一定値に保って，ベース電圧 V_{BE} を変化したとき，ベース電流 I_B の変化を測定すると，図 4 (c) の曲線が得られる。これらの特性を**エミッタ接地の電圧－電流特性**という。

次に，図 5 (a) の接続で，エミッタ電流 I_E をある一定値に保って，コレクタ・ベース間電圧 V_{CB} を変化したとき，コレクタ電流 I_C の変化を測定すると，図 5 (b) の曲線が得られる。また，コレクタ・ベース間電圧 V_{CB} をある一定値に保って，エミッタ・ベース間電圧 V_{EB}

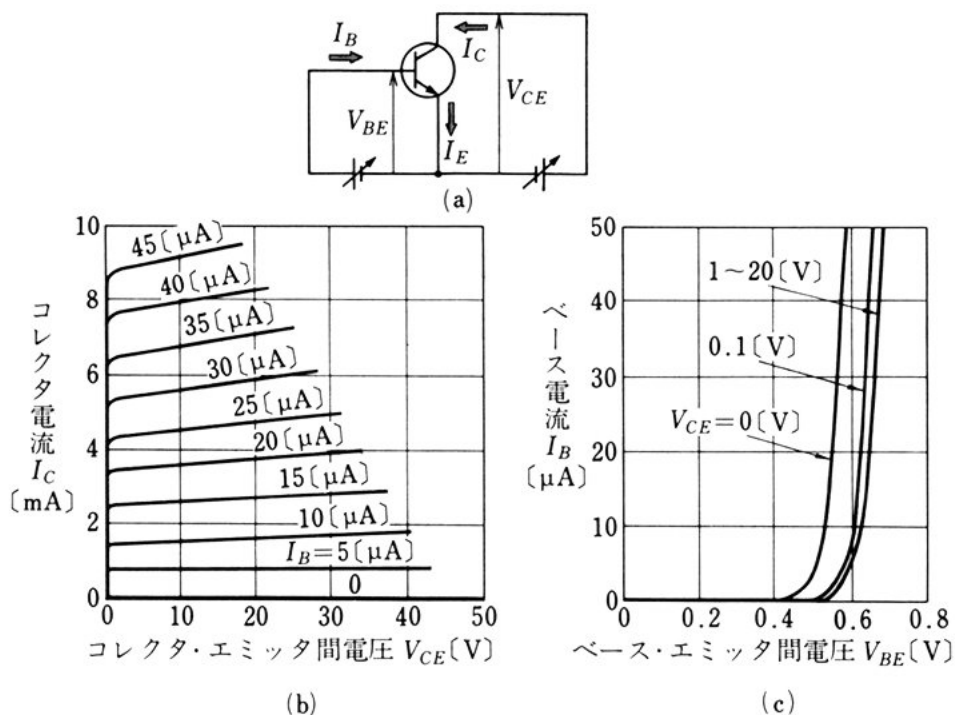



図 4　トランジスタ（2SC 945）の電圧－電流特性 (1)

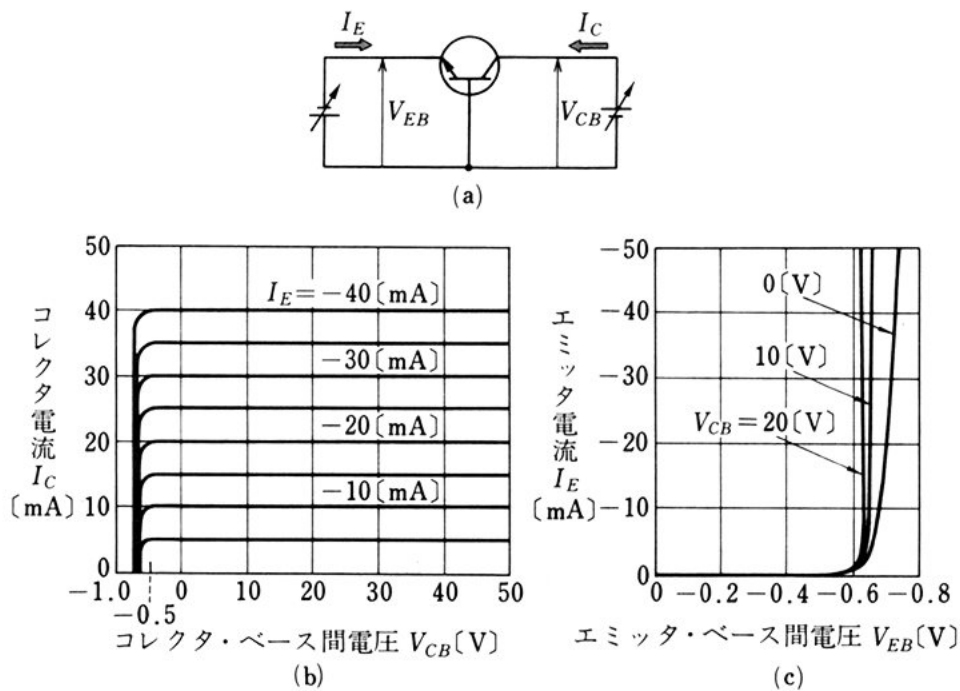



図 5　トランジスタ（2SC 945）の電圧－電流特性 (2)

を変化したとき，エミッタ電流 I_E の変化を測定すると，図5(c)の曲線が得られる。これらの特性を**ベース接地の電圧－電流特性**という。

問 2. 図5(b)で V_{CB} を負にしても，コレクタ電流が流れる理由を考えよ。

5

（3） トランジスタの動作範囲

I_B を一定にして V_{CE} を大きくしていくと，ついにはある電圧 BV_{CEO} 以上で，コレクタ・ベース間の接合部で，ダイオードで学んだような降伏現象が起こり，急激にコレクタ電流が増加して，トランジスタが破壊される。このようなことが起こるのは，図6で BV_{CEO} を通る垂直線より右の部分である。

10

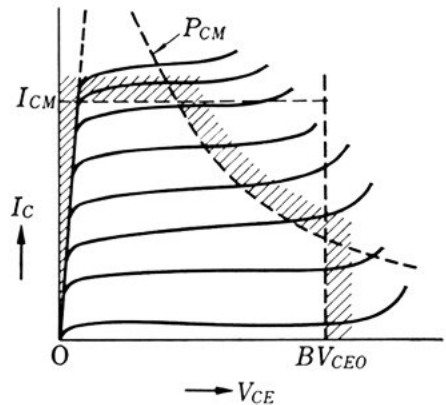
また，ベース電流を増すことによって，コレクタ電流を増していくと，あるコレクタ電流 I_{CM} 以上では，急に電流増幅作用が低下し始める。このようなことが起こるのは，図6で I_{CM} を通る水平線より上の部分である。

15

図 6　トランジスタの動作範囲

さらにコレクタ電流 I_C とコレクタ電圧 V_{CE} との積 P_C は，コレクタ損失電力に相当するが，P_C がトランジスタごとに決められた最大値 P_{CM} を超えると，接合部が高温になり破壊する。$P_C > P_{CM}$ に相当するのは，図の双曲線より右上方の部分である。

20

トランジスタの動作範囲には，このような制限があるので，図6で斜線を施してない領域だけが，安全動作領域である。

問 3. 図6で，P_{CM} を与える曲線が，双曲線となることを示せ。

(4)　トランジスタの h 定数

図4(a)の回路において，トランジスタのコレクタ電圧 V_{CE} を一定に保って，ベース電流 I_B を増加させると，コレクタ電流 I_C は増加する。この変化分を ΔI_B, ΔI_C としたとき，$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ を**エミッタ接地の電流増幅率***といい，記号 h_{fe} で表す。

$$h_{fe}=\left[\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right]_{(V_{CE}=一定)} \qquad (2)$$

代表的なトランジスタの h_{fe} の値は，20～150程度である。

次に，トランジスタのベース電流 I_B を一定に保って，コレクタ電圧を ΔV_{CE} だけ変化させると，コレクタ電流は ΔI_C だけ変化する。$\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}}$ を**出力コンダクタンス**といい，記号 h_{oe} で表し，単位はSである。

$$h_{oe}=\left[\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}}\right]_{(I_B=一定)} \qquad (3)$$

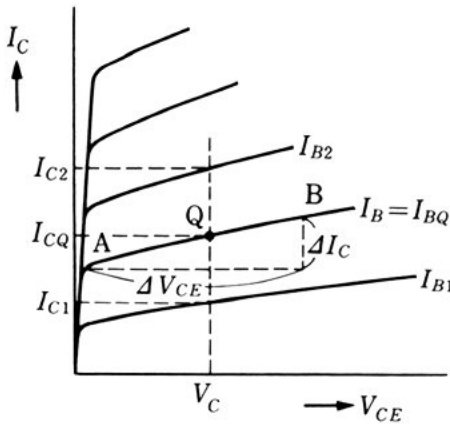
代表的なトランジスタの h_{oe} の値は，数十マイクロジーメンスであって，ふつう負荷コンダクタンスに比べて非常に小さいので，計算では無視できることが多い。

V_{CE} を一定に保って，ベース電圧 V_{BE} を ΔV_{BE} だけ変化させると，ベース電流 I_B は ΔI_B だけ変化する。$\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}$ を**入力抵抗**といい，記号 h_{ie} で表し，単位は Ω である。

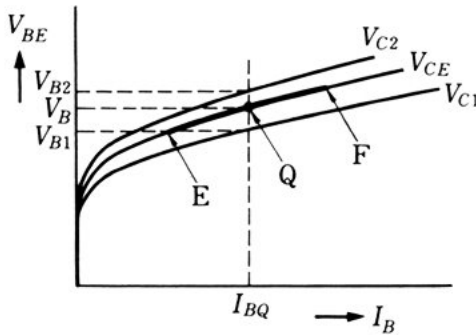
$$h_{ie}=\left[\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}\right]_{(V_{CE}=一定)} \qquad (4)$$

代表的なトランジスタの h_{ie} の値は，数百～1000〔Ω〕程度である。

また，ベース電流 I_B を一定に保って，コレクタ電圧を ΔV_{CE} だけ変化させると，ベース電圧は ΔV_{BE} だけ変化する。$\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}}$ を**電圧**

* 増幅回路では，出力電流と入力電流との比を電流増幅度というが，増幅回路の要素となるトランジスタや電子管では，この比を電流増幅率とよんでいる。

$$h_{fe}=\left[\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right]_{(V_{CE}=一定)}=\frac{I_{C2}-I_{C1}}{I_{B2}-I_{B1}}$$

$$h_{oe}=\left[\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}}\right]_{(I_B=一定)}=(\text{AB の傾き})$$

(a)

$$h_{ie}=\left[\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}\right]_{(V_{CE}=一定)}=(\text{EF の傾き})$$

$$h_{re}=\left[\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}}\right]_{(I_B=一定)}=\frac{V_{B2}-V_{B1}}{V_{C2}-V_{C1}}$$

(b)

図 7　エミッタ接地の *h* 定数

帰還率といい，記号 h_{re} で表す。

$$h_{re}=\left[\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}}\right]_{(I_B=一定)} \qquad (5)$$

代表的なトランジスタの h_{re} の値は，0.0001 程度で，きわめて小さいので，計算では無視できることが多い。

5　式（2）~（5）で定義される定数を，トランジスタの**エミッタ接地の *h* 定数**という。これらの定数は，図 7 (a), (b) に示すように，トランジスタの電圧－電流特性上の，変化量の比の値から求めることができる。

問 4. トランジスタの h_{fe}, h_{oe}, h_{ie}, h_{re} は，それぞれどんな量か。

2. トランジスタの等価回路

(1) トランジスタの増幅作用

トランジスタを図8(a)のように接続して，入力端子に交流信号源 v_i を加えたとき，トランジスタの電圧や電流が，どう変化するかを考えよう。

トランジスタの電圧－電流特性は，図(b),(c)のように与えられている。コレクタ電流 I_C が流れるとき，負荷抵抗 R_L の両端で電圧降下 $R_L I_C$ が生ずるので，コレクタ電圧 V_{CE} は，

$$V_{CE}=V_{CC}-R_L I_C \qquad (6)$$

となる。式(6)から，図(c)において，V_{CE} が V_{CC} となるA点と，I_C が $\dfrac{V_{CC}}{R_L}$ となるB点とを結んだ線は，**負荷直線**とよばれる。

交流信号源 v_i が，V_{BB} を中心として，時間とともに図(b)の下方の曲線のように変化すると，ベース電流 I_B は，図(b)の右方に示す

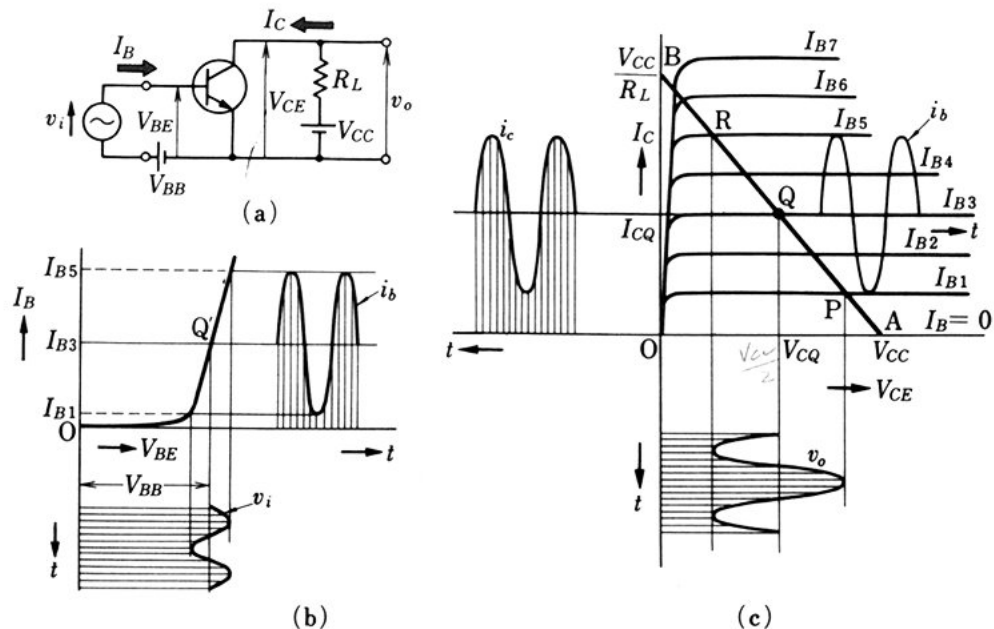
図8　トランジスタの増幅作用

ように，Q′ 点に対応する電流 I_{B3} を中心として，I_{B1} から I_{B5} まで変化する。I_B のこれらの変化に対応する負荷直線上の点を，図 8 (c) に求めると，V_{CE} と I_C は，Q 点を中心として，負荷直線上を P 点から R 点まで変化することになる。図 (c) の下方と左方に，それぞれ V_{CE} と I_C が，V_{BE} の変化に応じて，時間とともにどのように変化するかを示した。

図 (b), (c) で，交流信号源 v_i を加えないときのベース電圧は V_{BB}，ベース電流は I_{B3} である。このときのコレクタ電圧は V_{CQ}，コレクタ電流は I_{CQ} であって，点 Q は，入力のないときのトランジスタのコレクタ電圧とコレクタ電流を示す**動作静止点**である。

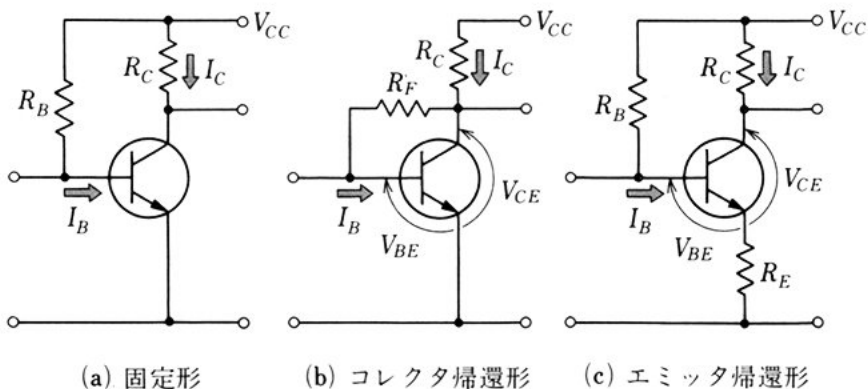
また，点 Q′ は，入力のないときのベース電圧とベース電流とを示す動作静止点であって，点 Q′ は，点 Q に対応した点である。

問 5. 負荷直線の引き方と，これのもつ意味を述べよ。

（2） トランジスタのバイアス回路

トランジスタを増幅器として動作させるために，適当な動作静止点で動作するように電源を加える回路を**バイアス回路**という。図 9 は，コレクタ電源 V_{CC} を利用するバイアス回路である。図 (a) は，

図 9 トランジスタのバイアス回路

(a) 固定形　(b) コレクタ帰還形　(c) エミッタ帰還形

固定バイアス回路とよばれ，簡単であるが，V_{CC} の変動などで静止点が変化する欠点がある。図(b)，(c)は，このような変化を少なくするように工夫された回路で，**コレクタ帰還形**，**エミッタ帰還形**とよばれる。

コレクタ帰還バイアス回路の電圧を，図9(b)のように定めると，

$$I_B=\frac{V_{CE}-V_{BE}}{R_F}$$

であるから，もしコレクタ電流 I_C が増加するような変動があれば，$V_{CE}=V_{CC}-I_CR_C$ であるので，I_B は I_C の変動を減少するように変化する。

エミッタ帰還バイアス回路では，

$$I_B=\frac{V_{CC}-V_{BE}-I_CR_E}{R_B}$$

であるから，I_C が増加すれば，同じように I_C の増加を抑制するように I_B が変わることになる。

（3）　トランジスタの等価回路

ベース電流が ΔI_B，コレクタ電圧が ΔV_{CE} 変化したときのコレクタ電流の変化を ΔI_C，ベース電圧の変化を ΔV_{BE} とすると，ΔI_B と ΔV_{CE} が小さければ，ΔI_C と ΔV_{BE} は次のように表される。

$$\Delta I_C=h_{fe}\Delta I_B+h_{oe}\Delta V_{CE} \qquad (7)$$

$$\Delta V_{BE}=h_{ie}\Delta I_B+h_{re}\Delta V_{CE} \qquad (8)$$

交流小信号の振幅を考える場合は，上式中の変化分 ΔI_C，ΔV_{BE}，ΔI_B および ΔV_{CE} を，それぞれ交流分 i_c，v_{be}，i_b，v_{ce} で置き換えれば，

$$i_c=h_{fe}i_b+h_{oe}v_{ce} \qquad (9)$$

$$v_{be}=h_{ie}i_b+h_{re}v_{ce} \qquad (10)$$

の関係がなりたつ。

式（9），(10)から，トランジスタは，図10に示すような入出力

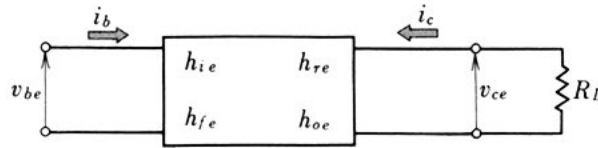



図 10 トランジスタの四端子回路網

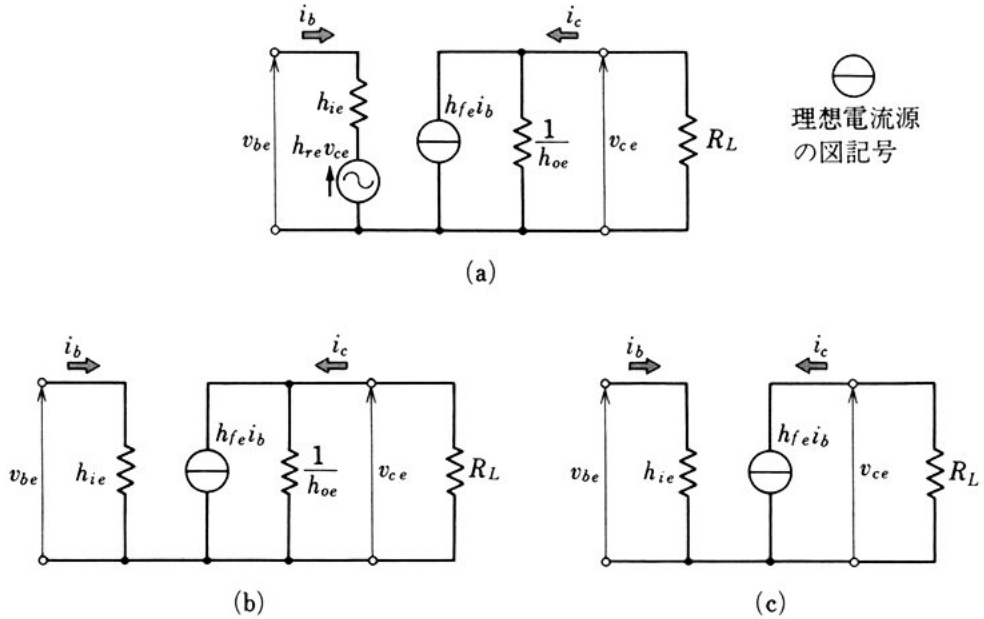



図 11 トランジスタの等価回路

の間に h 定数をもつ回路網と等価であると考えられる。 式(9), (10) を電気回路として表現すると，一定電流 $h_{fe}I_b$ を流し出すような理想電流源と，並列抵抗 $\frac{1}{h_{oe}}$，帰還電圧 $h_{re}v_{ce}$ を用いて，図 11 (a) のようになる。

出力端子に負荷抵抗 R_L を接続したとき，前に学んだように，$\frac{1}{h_{oe}}$ は R_L に比べて非常に大きく，h_{re} は非常に小さいので，計算を容易にするため，これらを無視して，等価回路を図 11 (b), (c) のように書くこともある。

問 6. V_{CE} が一定ならば，$\Delta V_{CE}=0$ となり，式（7）から式（2）が導かれ，式（8）から式（4）が導かれる。また，I_B が一定ならば，$\Delta I_B=0$ となり，式（7）から式（3）が導かれ，式（8）から式（5）

が導かれることを確かめよ。

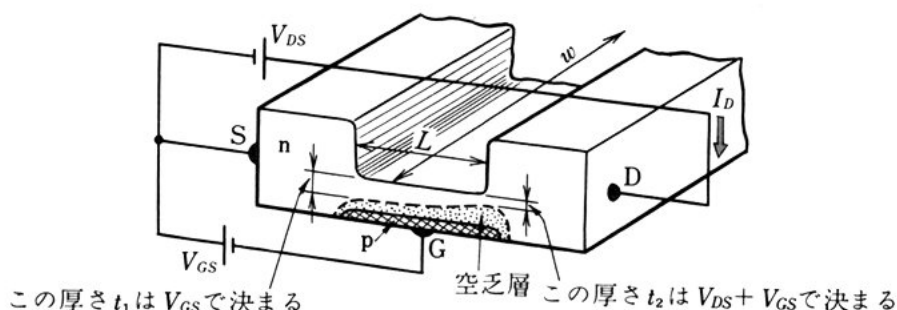
問 7. トランジスタの等価回路が，実用的には図 11 (b)，(c) のようにしてよい理由を述べよ。

3. 電界効果トランジスタ

(1) 電界効果トランジスタの構造

前に学んだトランジスタと異なり，電界による電流の制御を動作原理とする半導体素子を**電界効果トランジスタ** (field effect transistor: **FET**) という。

FET は，図 12 のような構造で，D 電極 (**ドレイン**) と S 電極 (**ソース**) の間に電圧 V_{DS} を加えると，電流 (**ドレイン電流**) I_D が流れる。さらに，G 電極 (**ゲート**) とソースの間に，図 12 のように逆方向電圧 (**ゲート電圧**) V_{GS} を加えると，pn 接合の空乏層は逆方向電圧のため広がる。とくにドレインの側は逆方向電圧が高くなるので，図の破線で示したように空乏層が広がり，ドレイン電流 I_D の通路 (**チャネル**) はせまくなる。V_{DS} を高くすれば I_D は増加するが，V_{GS} が加えられてドレイン側の通路がせまくなるようになると，一定の電流密度以上の電流は通りにくくなるので，I_D は飽和するよ

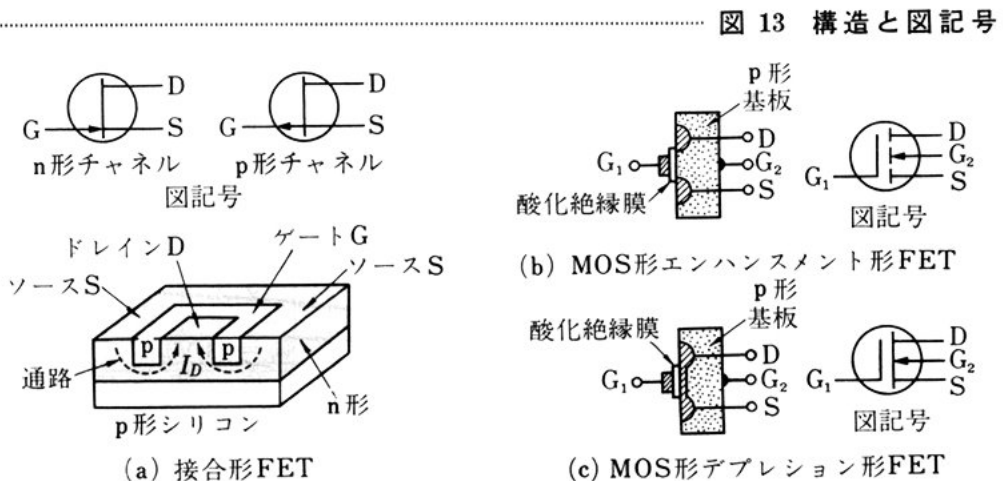
図 12 電界効果トランジスタの原理図

うになる。I_D が飽和するようになる V_{DS} の値を**ピンチオフ** (pinch off) **電圧** V_p という。したがって，V_{GS} を大きくすると I_D は減少する。このように，FET はゲート電圧 V_{GS} の大きさで，ドレイン電流の流れる通路の大きさを変え，I_D の大きさを変える素子である。通路が n 形半導体のとき **n 形チャネル**，p 形半導体のとき **p 形チャネル**という。

問 8. 図 12 で，I_D の通路は，ドレイン側がせまくなるのはなぜか。

FET の通路の厚さ t_1, t_2 は 1〔μm〕以下できわめて薄く，長さ L も短い。しかし，I_D の通路の幅 w が大きくとられ，大きな I_D を流せるようになっている。実際の構造は，図 13(a) のように，例えば，p 形シリコンを基板として，この中に図 12 の構造が埋め込まれたように作られる。このような構造のものを**接合形**という。接合形のほかに，図 13(b)，(c) のように，半導体の表面に絶縁の良いごく薄い酸化絶縁膜を作って，これに金属を蒸着してゲートとした構造の **MOS** (metal oxide semiconductor) **形**がある。これは，ゲートとほかの電極との絶縁がきわめて良い特徴がある。

図 (b) で，ゲート G_1 に基板 G_2 よりも高い電圧を加えると，誘導作

図 13 構造と図記号

(a) 接合形FET
(b) MOS形エンハンスメント形FET
(c) MOS形デプレション形FET

用によって，p形半導体の表面に電荷が集まり，n形チャネルができる。ゲートの正電圧を増すと，チャネルの電子が増加するので，チャネルの導電性が良くなり，ドレイン電流が増加する。ゲートに電圧を加えない状態では，チャネルが形成されないので，ドレイン電流はほとんど流れない。このようなMOS形FETを**エンハンスメント**(enhancement)**形**という。

図(c)では，ソースとドレインの間で，p形半導体の表面に，n形チャネルが拡散によって作られている。したがって，ゲートに電圧を加えない状態でも，ドレイン電流が流れる。ゲート電圧を負に増加していくと，接合形と同様に，チャネルがせまくなって，ドレイン電流が減少する。このようなMOS形FETを**デプレション**

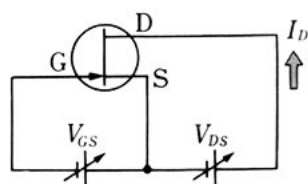
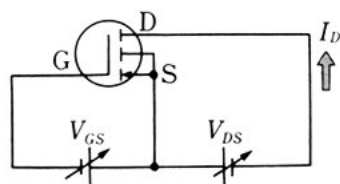
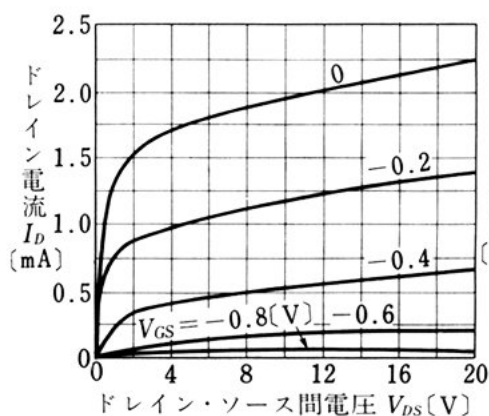
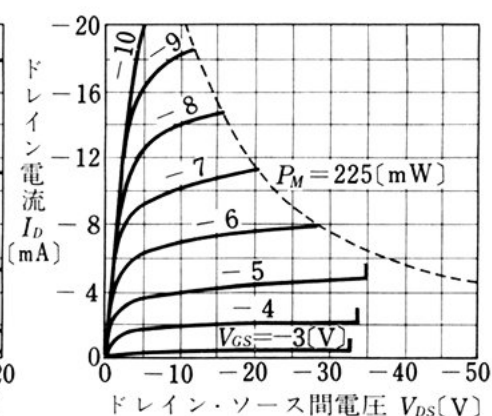
図 14　FET の 回 路

(a) 接合形FET
(n形チャネル)

(b) エンハンスメント形FET
(p形チャネル)

図 15　図14の V_{DS}-I_D 特性

(a) 接合形FET(n形チャネル)
(2SK37)

(b) エンハンスメント形 FET
(p形チャネル) (2SJ 11A)

(depletion) 形という。

問 9. MOS 形 FET のエンハンスメント形とデプレション形の違いを説明せよ。

(2) FET の特性

5 図 14 のように電源を接続して，FET の電圧と電流の関係を調べると，図 15 (a), (b) のような特性が得られる。ドレイン・ソース間電圧 V_{DS} が低い間は，ドレイン電流 I_D は V_{DS} にほぼ比例するが，V_{GS} を加えて通路をせまくすると，I_D は V_{DS} に無関係に一定値に近づくようになる。これは，加速電界が高くなると，半導体のキャ

10 リヤの速度が，一定の飽和値 (ほぼ 10^5〔m/s〕) になってしまうので，I_D はチャネルの最小断面で決まるある電流値になるからである。このように，FET の I_D と V_{GS} の関係から，相互コンダクタンスが定義される。ゲート電流 I_G はきわめて小さく，**相互コンダクタンス**

$$g_m=\left|\frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}\right|_{(V_{DS}=\text{一定})}$$ は，1～10〔mS〕でかなり大きい。

15 FET は，半導体中の多数キャリヤの伝導作用を制御する素子であるから，通路の長さ L を短くすることで，ギガヘルツに及ぶ高い周波数でも使え，雑音もほかの素子より少ないという利点がある。

(3) FET の等価回路

デプレション形 FET は，図 16 (a) のように R_s と C_s とを入れて，

20 ゲートに適当なバイアスを加えて用いる。その動作は，動作点や負荷直線を使って，p. 38 で述べたトランジスタ回路と同じように考えることができる。

FET のゲートの絶縁はきわめて良い。ゲート回路は開放されていて，FET の働きはゲートに加えられた交流電圧 v_g に比例した定

25 電流源 $g_m v_g$ で示され，小信号入力に対する動作は，図 (b) の等価回

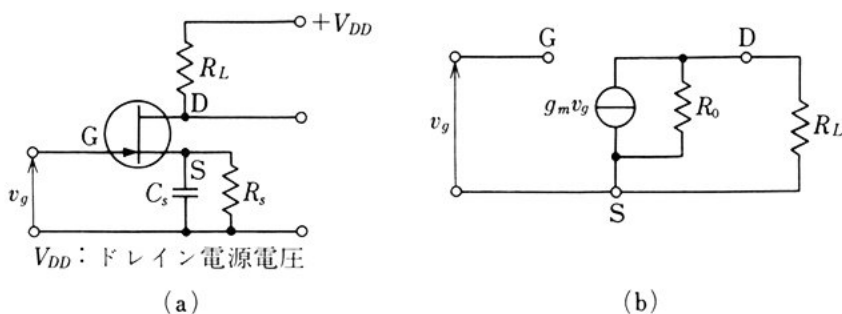



図 16　FETの等価回路

路で考えてよい。R_0 は通路の交流的な抵抗を意味する。FETの増幅作用は g_m が大きいほど良い。g_m の大きさは，ほぼ $\sqrt{I_D}$ に比例し，ピンチオフ電圧 V_P が低いものほど大きくなる。

問　　題

1.　pnp形トランジスタと，npn形トランジスタとの違いを説明せよ。

2.　npn形トランジスタのエミッタ側とコレクタ側は，ともにn形である。両者はどのように違うか。

3.　図8(a)のトランジスタ回路で，トランジスタの特性は図4で与えられる。$V_{CC}=40$〔V〕，$R_L=5$〔kΩ〕であるとき，このトランジスタのベース電流 I_B に対するコレクタ電流 I_C の関係をグラフにかいてみよ。

4.　図4に示すトランジスタの電圧－電流特性の図から，$V_{CE}=20$〔V〕，$I_B=20$〔μA〕における h 定数の値を求めよ。

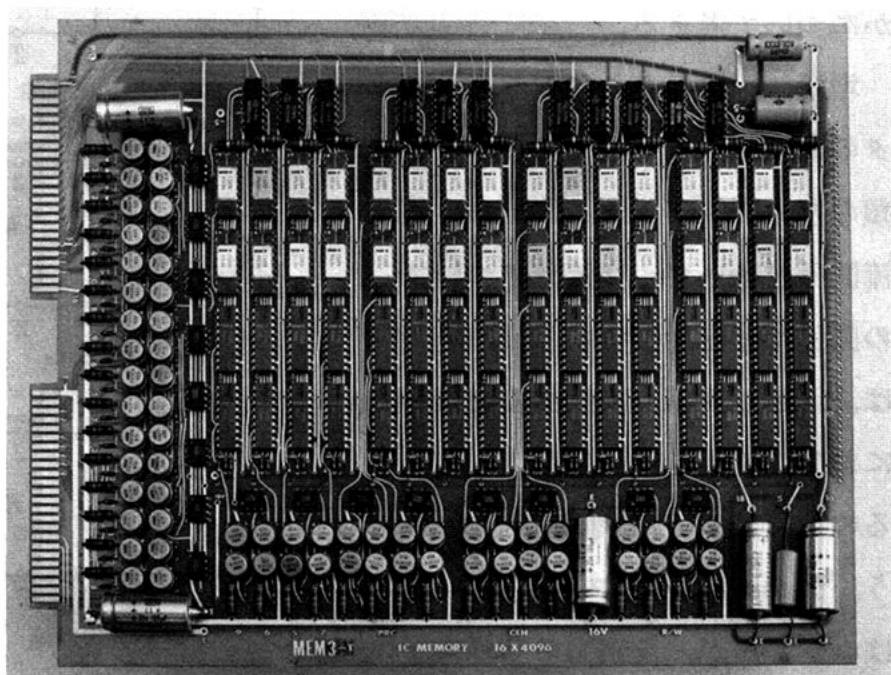
5.　図9(a)のバイアス回路で，$V_{CC}=40$〔V〕，$R_C=5$〔kΩ〕のとき，$I_B=20$〔μA〕とするためには，R_B は何オームにすればよいか。

6.　図14(b)のFETの回路において，FETの特性が図15(b)である。V_{GS} に対するドレイン電流 I_D の関係をグラフにかいてみよ。

7.　前問の結果から，このFETの相互コンダクタンス g_m を求めよ。

第3章
電子回路

トランジスタ回路の動作を理解するうえで，基礎になるのは増幅回路である。ここでは，いくつかの基本的な増幅回路について学び，さらに，通信機や電子計算機の制御装置などに使われるいろいろなトランジスタ回路のあらましについて調べる。

電子計算機用記録部ユニット

1 増幅回路

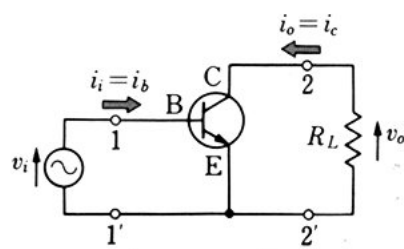
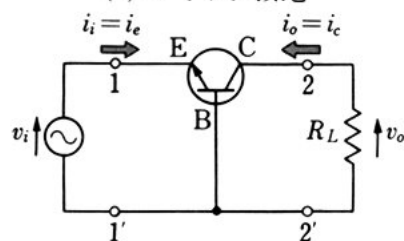
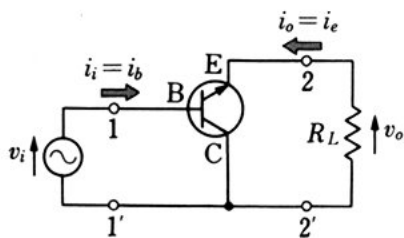
この節のねらい　前章で，トランジスタの特性とその増幅作用について学んだ。ここでは，トランジスタの増幅回路と，トランジスタ増幅回路の動作を安定させるための帰還増幅回路とについて調べ，負荷になるべく大きな電力を供給できるようにする電力増幅回路についても学ぶ。

1. 増幅回路の基礎

（1） 増幅基本回路

図1のように，トランジスタ増幅回路の端子11′に正弦波入力信号を加えたとき，端子22′にどのような正弦波出力信号が得られるかについて考える。

増幅に用いるときのトランジスタの結線法には，図1に示す3種類の基本回路がある。図では，直流関係を除いて，交流分についての関係だけを示してある。図(a)では，エミッタが，入出力の交流分に対して共通端子に接続されているので，**エミッタ接地増幅回路**という。図(b)ではベースが，図(c)ではコレクタが，入出力の共通端子

図1 増幅回路

(a) エミッタ接地

(b) ベース接地

(c) コレクタ接地

に接続されているので，それぞれ**ベース接地増幅回路・コレクタ接地増幅回路**という。

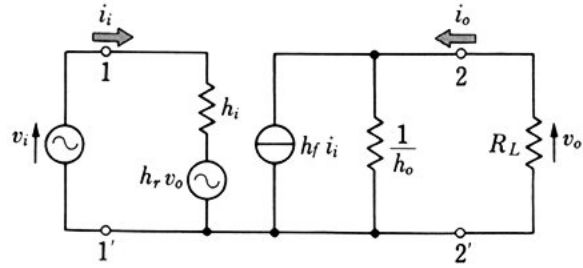



図 2　図1の増幅回路の等価回路

これらの増幅基本回路は，いずれも図2に示す等価回路で表される。しかし，それぞれ結線方法が異なるので，同じトランジスタでも，h 定数の値は異っている。したがって，エミッタ接地の h 定数には添字 e をつけて，h_{ie}, h_{fe}, h_{oe}, h_{re} のように表す。同じように，ベース接地の h 定数には添字 b，コレクタ接地の h 定数には添字 c をつける。例えば，ベース接地電流増幅率 h_{fb} は，図1(b)の回路において，v_o を0としたとき（$R_L=0$）の i_o と i_i の比を表す。この場合の入力交流電圧 v_i および入力交流電流 i_i は，それぞれ v_{eb}, i_e であり，出力交流電圧 v_o および出力交流電流 i_o は，それぞれ v_{cb}, i_c である。

同じトランジスタを異なった基本回路で用いる場合は，結線方法が異なるだけであるから，それぞれ h の定数の値は異なっていてはいるが，それらの間には一定の関係がある。ベース接地・コレクタ接地の h 定数と，エミッタ接地の h 定数との関係を表1に示す。

表 1

記　号	エミッタ接地 h 定数による表示
h_{ie}	h_{ie}
h_{re}	$h_{re}(\ll 1)$
h_{fe}	$h_{fe}(\gg 1)$
h_{oe}	h_{oe}
h_{ib}	$\dfrac{h_{ie}}{1+h_{fe}}$
h_{rb}	$\dfrac{h_{ie}h_{oe}}{1+h_{fe}}-h_{re}$
h_{fb}	$-\dfrac{h_{fe}}{1+h_{fe}}$
h_{ob}	$\dfrac{h_{oe}}{1+h_{fe}}$
h_{ic}	h_{ie}
h_{rc}	$1-h_{re}(\fallingdotseq 1)$
h_{fc}	$-(1+h_{fe})$
h_{oc}	h_{oe}

(2) エミッタ接地増幅回路

図1(a)の回路は，h_{re} が非常に小さい値なので，図3のような等価回路で書ける。図から，電流増幅度 $\frac{i_o}{i_i}$ および電圧増幅度 $\frac{v_o}{v_i}$ を求めてみよう。

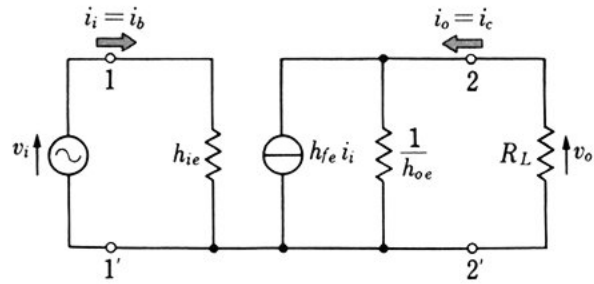



図 3 エミッタ接地増幅回路

電流増幅度　図3から，

$$i_o=\frac{h_{fe}i_i}{\frac{1}{h_{oe}}+R_L}\cdot\frac{1}{h_{oe}}=\frac{h_{fe}}{1+h_{oe}R_L}i_i \qquad (1)$$

となるから，電流増幅度を A_i で表すと，

$$A_i=\frac{i_o}{i_i}=\frac{h_{fe}}{1+h_{oe}R_L} \qquad (2)$$

ふつう $h_{oe}R_L$ は，1に比べて非常に小さいので，

$$A_i \fallingdotseq h_{fe} \qquad (3)$$

とみなしてよい。

電圧増幅度　図3から，

$$v_o=-R_Li_o$$

式(1)を用いて，

$$v_o=-\frac{h_{fe}R_L}{1+h_{oe}R_L}i_i \fallingdotseq -h_{fe}R_Li_i \qquad (4)$$

ところが，$i_i=\frac{v_i}{h_{ie}}$ であるから，これを式(4)に代入して，

$$v_o \fallingdotseq -\frac{h_{fe}}{h_{ie}}R_Lv_i \qquad (5)$$

したがって，電圧増幅度を A_v で表すと，

$$A_v=\frac{v_o}{v_i}=-\frac{h_{fe}}{h_{ie}}R_L \qquad (6)$$

A_v の値が負であるのは，入力電圧 v_i と出力電圧 v_o とは逆位相になっていることを意味する。

電圧増幅度 A_v と電流増幅度 A_i の積 A_vA_i を**電力増幅度** A_p という。いま，h_{fe} を50とすると，A_i は約50である。この増幅回路の次に，同じトランジスタが接続されるとすると，負荷は，次段のトランジスタの h_{ie} に等しいので，A_v も50となり，A_p は2500となる。

（3） コレクタ接地増幅回路

図1(c)のコレクタ接地増幅回路において，h_{rc} は1に近い値であるから，等価回路は図4のようになる。電流増幅度は，他の基本増幅回路と同じように，

$$A_i \fallingdotseq h_{fc} \qquad (7)$$

となり，表1の関係から，

$$A_i \fallingdotseq h_{fc}=-(1+h_{fe}) \fallingdotseq -h_{fe}$$

であるから，電流増幅度の大きさは，エミッタ接地増幅回路の場合とほぼ同じである。

また，式(4)と同じように，

$$v_o \fallingdotseq -h_{fc}R_Li_i \fallingdotseq h_{fe}R_Li_i \qquad (8)$$

図4から，

$$v_i=h_{ic}i_i+h_{rc}v_o \qquad (9)$$

したがって，

$$i_i=\frac{v_i-h_{rc}v_o}{h_{ic}}$$

$h_{ic}=h_{ie}$，$h_{rc} \fallingdotseq 1$ であるから，

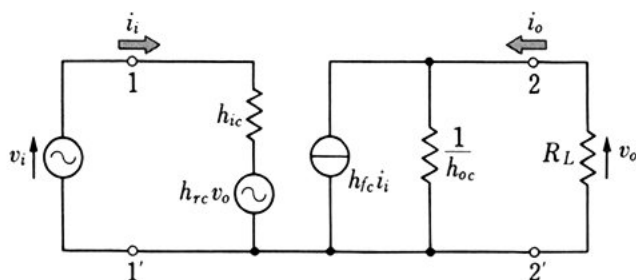



図 4 コレクタ接地増幅回路

$$i_i=\frac{v_i-v_o}{h_{ie}}$$

この式を式（8）に代入して整理すると,

$$v_o=\frac{h_{fe}R_L}{\left(1+\frac{R_L}{h_{ie}}h_{fe}\right)h_{ie}}v_i \qquad \therefore \quad A_v=\frac{h_{fe}R_L}{\left(1+\frac{R_L}{h_{ie}}h_{fe}\right)h_{ie}}$$

$\frac{h_{fe}R_L}{h_{ie}}$ が1に比べて非常に大きいと,

$$A_v\fallingdotseq 1 \tag{10}$$

コレクタ接地増幅回路の電圧増幅度は，ほぼ1（1より少し小さい）であって，v_i と v_o は同位相である。

式（7）と式（10）からわかるように，コレクタ接地増幅回路は，電流は増幅するが，電圧は増幅しない。したがって，電力増幅度は，エミッタ接地増幅回路の場合に比べて小さい。

コレクタ接地増幅回路は，**エミッタホロワ**とよばれることがある。

問 1. エミッタ接地増幅回路の電力増幅度が大きい理由を述べよ。

問 2. コレクタ接地増幅回路では，電圧増幅度が1より少し小さい値になる理由を考えよ。

（4） 基本増幅回路の縦続

増幅器は，基本増幅回路をいくつか縦続して，全体として必要な電流増幅度や電圧増幅度を得るように設計する。各段の電流増幅度

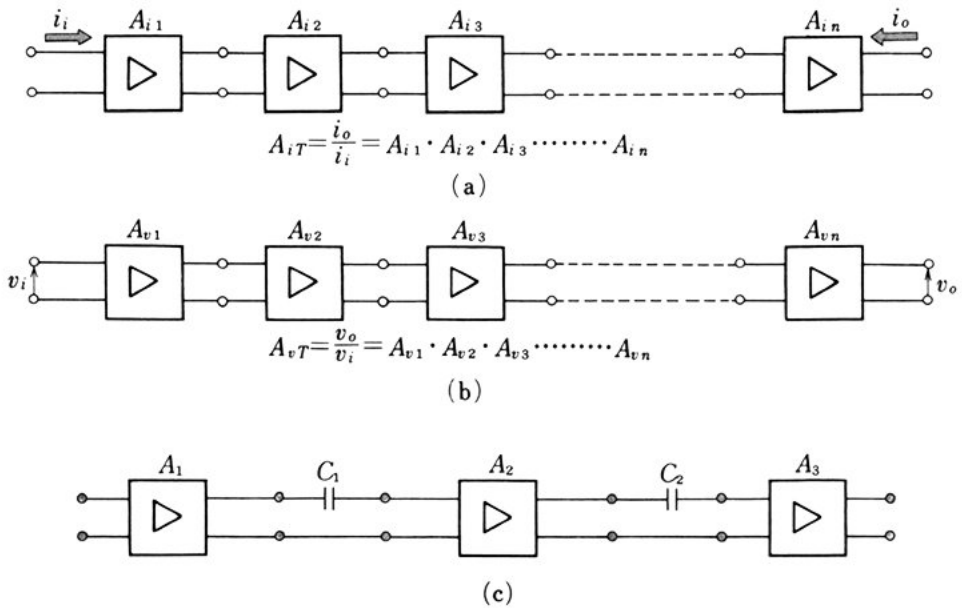



図 5 いくつも接続された増幅回路

をそれぞれ A_{i1}, A_{i2}, …, A_{in}, 全体の電流増幅度を A_{iT} とすると，

$$A_{iT}=A_{i1}\cdot A_{i2}\cdots\cdot A_{in}$$

電圧増幅度についても

$$A_{vT}=A_{v1}\cdot A_{v2}\cdots\cdot A_{vn}$$

このような増幅器の最終出力端子には，スピーカなどが負荷として接続される。

交流信号を増幅する場合には，直流出力電圧・電流を次段のトランジスタに加える必要がないので，各段の間には図 5 (c) に示すように，コンデンサをそう入して，交流出力だけを次段に加えることができる。このような増幅回路を ***CR* 結合増幅回路**という。

問 3． 図１のエミッタ接地・ベース接地・コレクタ接地の増幅回路で，$R_L=1$〔kΩ〕とし，トランジスタの h 定数を $h_{ie}=1500$〔Ω〕, $h_{re}=10^{-4}$, $h_{fe}=100$, $h_{oe}=10^{-6}$〔S〕としたときの電圧増幅度・電力増幅度を求め，比べよ。

(5) 利得とデシベル

出力電力 P_o と入力電力 P_i との比を**電力利得**とよび，通常は対数をとり，次式で定義した G_p で表す。

$$G_p=10\log_{10}\frac{P_o}{P_i}=10\log_{10}\left|\frac{i_o v_o}{i_i v_i}\right|=10\log_{10}A_p\ \text{〔dB〕}$$

いくつも接続された増幅回路の全体の増幅度 A_T は，各増幅回路の増幅度 $A_1, A_2, \cdots$ の積で計算しなければならないが，対数を用いると，全体の利得 G_T は，各増幅回路の利得 $G_1, G_2, \cdots$ の和で計算することができる。

$$G_1=20\log_{10}A_1,\quad G_2=20\log_{10}A_2,\ \cdots\cdots,\ G_n=20\log_{10}A_n$$

とすれば，全体の利得 G_T〔dB〕は，次のようになる。

$$G_T=G_1+G_2+\cdots\cdots+G_n$$

また，増幅度の範囲が大きい場合，対数を用いることで，数値の範囲がせまくてすむ利点もある。対数そのままでは，実用上値が小さくなりすぎるので，値を10倍して**デシベル**〔dB〕を利得の単位として用いる。

通信などの実用の回線のように，回路のインピーダンスが規格で一定の場合には，電力は電圧の2乗に比例するので，入出力の電圧をそれぞれ v_i, v_o とすれば，電力利得 G_p は，

$$G_p=10\log\frac{{v_o}^2}{{v_i}^2}=20\log_{10}\frac{v_o}{v_i}=20\log_{10}A_v$$

となる。

デシベルはまた，電力 P や電圧 V などの大きさを表すときにも用いられる。一定の標準になる電力 P_s や電圧 V_s などを定めておき，電力 P や電圧 V とこれらとの比の対数をデシベルで表して，それぞれの電力や電圧を

$$10\log_{10}\frac{P}{P_s}\text{〔dB〕},\quad 20\log_{10}\frac{V}{V_s}\ \text{〔dB〕}$$

のように示すのである。このとき，標準にした電力 P_s や電圧 V_s はどちらも 0〔dB〕である。

問 4. 問3の電圧増幅度・電力増幅度をデシベルで表せ。

2. 帰還増幅回路

5 トランジスタ増幅回路において，特性の変動を減らし，安定な動作をさせるため，負帰還増幅回路とよばれる回路が用いられる。

（1） 帰還増幅の原理

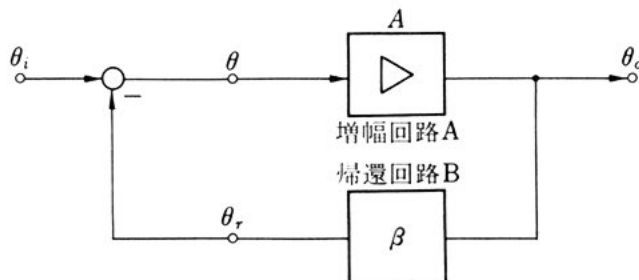
図6で，θ_i は入力電圧または入力電流で，θ_o は出力電圧または出力電流である。A は増幅度 A の増幅回路，B は出力電圧または
10 出力電流 θ_o の一部 θ_r を入力側にもどす回路である。このように，出力の一部を入力側にもどすことを**帰還**（feedback，**フィードバック**）といい，そのための回路を**帰還回路**という。

このような帰還回路のついた増幅回路の増幅度を求めてみよう。

$\theta=\theta_i-\theta_r$ で，これが増幅回路 A の入力信号として加えられ，図
15 6で増幅度 A は $\dfrac{\theta_o}{\theta}$ で定義される。θ_i, θ_o がそれぞれ入出力の電圧であれば**電圧増幅度**，電流であれば**電流増幅度**である。

増幅回路の入力信号と出力信号の関係は，

$$\theta_o=A(\theta_i-\theta_r) \tag{11}$$

図 6 負帰還の原理

帰還回路について θ_r と θ_o との比を**帰還率**といい，これを β とすると，

$$\theta_r=\beta\theta_o \qquad (12)$$

式 (12) を式 (11) に代入すると，

$$\theta_o=A\theta_i-A\beta\theta_o \qquad \therefore \quad \theta_o=\frac{A}{1+A\beta}\theta_i \qquad (13)$$

この帰還増幅回路全体の増幅度 A' は，$\dfrac{\theta_o}{\theta_i}$ で与えられるので，式 (13) から，

$$A'=\frac{A}{1+A\beta} \qquad (14)$$

β を 0 とすると，A' は A に等しい。$A\beta$ が正であると，

$$A'<A \qquad (15)$$

となる。

図 6 のような構成を**帰還増幅回路**，式 (15) がなりたつ場合を**負帰還**（negative feedback：NFB）という。

増幅回路は，トランジスタを用いて構成され，増幅度 A は，トランジスタの動作状態や周波数によって変化する。$A\beta$ の正の値を 1 に比べて非常に大きくすると，式 (14) から，

$$A' \fallingdotseq \frac{1}{\beta} \qquad (16)$$

帰還回路は，トランジスタを含まない回路であるが，さらに抵抗だけで構成されていれば，β は周波数が変わっても一定である。

このように，負帰還増幅回路において，$A\beta$ の値を大きくすることにより，トラジスタの動作状態や周波数にあまり左右されない増幅回路を得ることができる。

また，$A\beta$ が負であって，絶対値が 1 より小さいと，

$$A'>A \qquad (17)$$

となる。上式がなりたつ場合を**正帰還**という。$A\beta=-1$ となると，A' は無限大になり，回路は発振状態となる。

問 5. $A\beta>1$ にするためには，A の大きさをどのようにしなければならないか。

（2） 負帰還増幅回路の形式

負帰還増幅は，出力側における信号 θ_o に電圧をとるか，電流をとるかによって，**電圧帰還形**と**電流帰還形**に分けられる。また，入力側において，信号 θ_i, θ_r に電圧をとるか電流をとるかによって，**直列帰還形**と**並列帰還形**に分けられる。これらを組み合わせた4種類の負帰還基本回路を図7に示す。

帰還のない場合に比べて，電圧帰還形では出力インピーダンスが減少し，電流帰還形では増加する。一方直列帰還形は，帰還のない場合に比べて，入力インピーダンスが増加し，並列帰還形では減少する。

図 7　負帰還基本回路

(a) 電圧直列　(b) 電流直列
(c) 電圧並列　(d) 電流並列

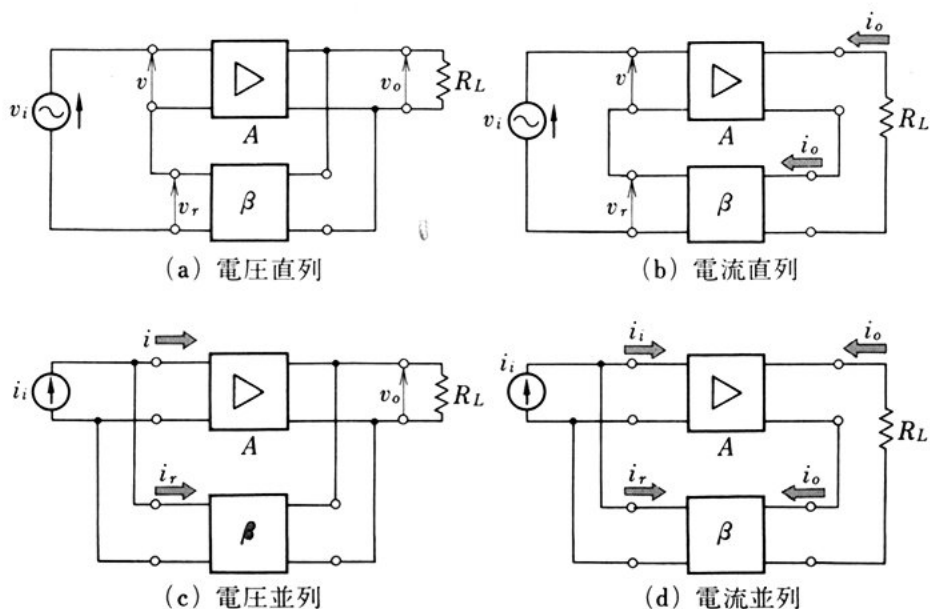
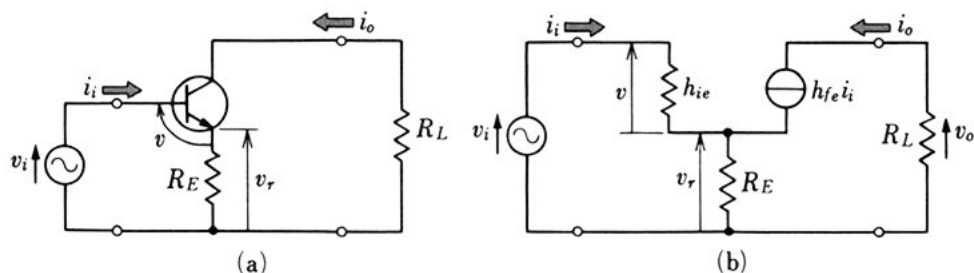



図 8　電流直列負帰還増幅回路

(3)　負帰還増幅回路の例

電流直列負帰還増幅回路　　図 8 (a) は，電流直列負帰還増幅回路の例である。等価回路を図(b) に示す。

θ_i, θ_o として，それぞれ入出力の電圧をとることにすれば，

$$-v_o=i_oR_L, \qquad v_r=i_oR_E$$

したがって，

$$A_v=\frac{v_o}{v}=\frac{-h_{fe}i_iR_L}{h_{ie}i_i}=\frac{-h_{fe}R_L}{h_{ie}} \tag{18}$$

$$\beta=\frac{v_r}{v_o}=\frac{-R_E}{R_L} \tag{19}$$

全体の電圧増幅度 A_v' は，式 (14) の計算と同様にして，

$$A_v'=\frac{v_o}{v_i}=\frac{A_v}{1+A_v\beta}=\frac{-\dfrac{h_{fe}R_L}{h_{ie}}}{1+\dfrac{h_{fe}R_E}{h_{ie}}} \tag{20}$$

h_{fe} はふつう数十以上であり，$h_{fe}R_E$ は h_{ie} に比べて非常に大きくできるので，電圧増幅度は $\dfrac{-R_L}{R_E}$ に近づき，トランジスタの動作状態に無関係になる。

電圧並列負帰還増幅回路　　図 9 (a) は，出力電圧が Z_F を通して入力回路に並列に帰還される電圧並列負帰還増幅回路の例で，等価回路を図 (b) に示す。θ_i, θ_o として，それぞれ入出力の電流 i_i, i_o をとることにすれば，図 (b) から，電流増幅度 A_i は，

$$A_i=\frac{\theta_o}{\theta}=\frac{i_o}{i}=h_{fe} \tag{21}$$

帰還率 β は，

$$\beta=\frac{i_r}{i_o}=\frac{\dfrac{-v_o}{Z_F}}{i_o}=\frac{i_o\dfrac{R_L}{Z_F}}{i_o}=\frac{R_L}{Z_F} \tag{22}$$

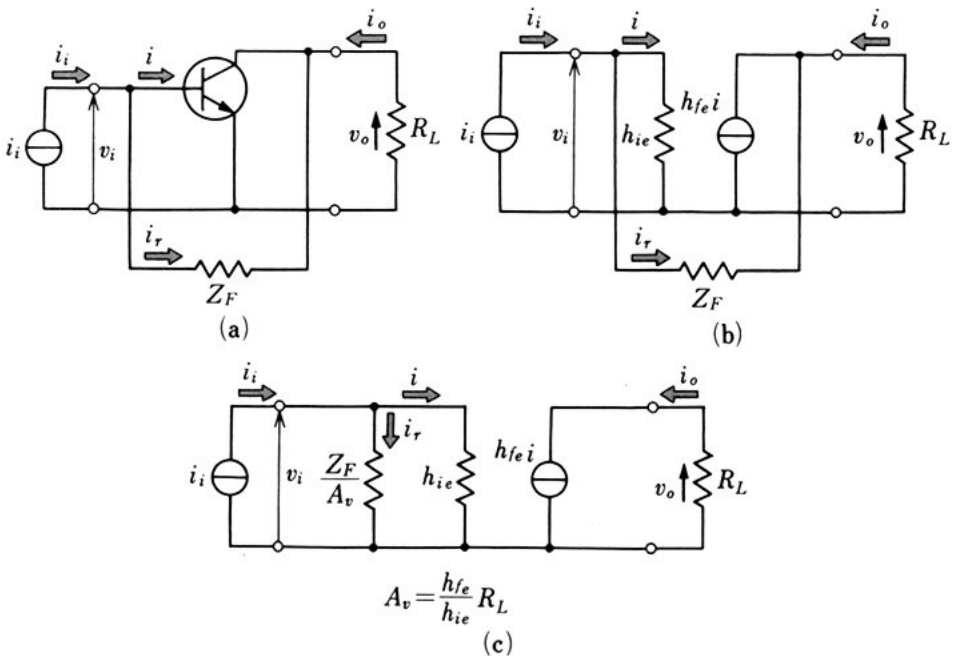
となるから，全体の電流増幅率 A_i' は，式 (14) と同じようにして，

$$A_i'=\frac{i_o}{i_i}=\frac{A_i}{1+A_i\beta}=\frac{h_{fe}}{1+\dfrac{h_{fe}R_L}{Z_F}} \tag{23}$$

$\dfrac{h_{fe}R_L}{Z_F}$ が1に比べて非常に大きくなると，電流増幅度 A_i は $\dfrac{Z_F}{R_L}$ に近づき，A_i' はトランジスタの特性 h_{fe} には無関係になる。

この増幅回路は，次のように考えることもできる。図 9 (b) から，

$$i_r=\frac{v_i-v_o}{Z_F} \tag{24}$$

図 9　電圧並列負帰還増幅回路

ふつう，$v_i \ll v_o$ であり，$A_v=\dfrac{v_o}{v_i}$ とすれば，

$$i_r=\frac{-v_o}{Z_F}=v_i\frac{-A_v}{Z_F} \qquad (25)$$

と考えることができる。ふつう Z_F は，R_L に比べてきわめて大きいので，i_r は i_o に比べて無視できる。図(b)は，図(c)のように，入力側に $\dfrac{Z_F}{A_v}$ のインピーダンスが並列に接続されたのと同じように働く。Z_F が $\dfrac{1}{\omega C_F}$ であるようなコンデンサが接続された場合，入力回路には，h_{ie} と並列に $A_v C_F$ である大きなコンデンサが接続された場合と同じようになる。

問 6. 負帰還増幅回路の特徴を述べよ。

問 7. 図9(c)の回路で，電流増幅度 A_i を計算すると，式(23)と同じ結果になることを示せ。

3. 電力増幅回路

(1) 電 力 増 幅

いままで電圧増幅・電流増幅について学んできた。増幅回路の最終段においては，スピーカなどが負荷として用いられる。このような増幅回路では，負荷にできるだけ大きな電力を供給する必要がある。ここでは，このような増幅回路すなわち電力増幅回路について調べる。

トランジスタには，コレクタで消費できる最大電力 P_{CM} が決められており，コレクタでの損失電力が P_{CM} の値を超えると，トランジスタは破壊する。

図10(a)の回路に用いるトランジスタの，理想化した V_{CE}-I_C 特

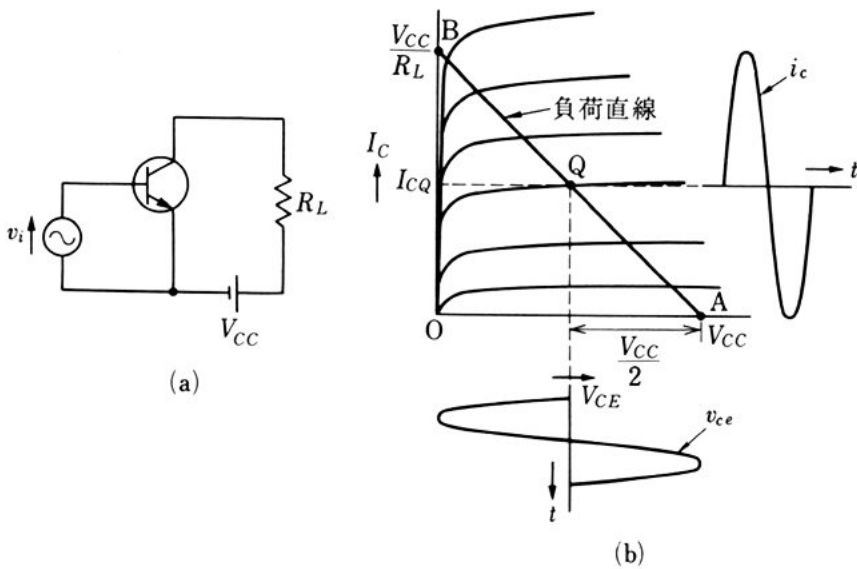



図 10 A 級 増 幅

性曲線を図(b)に示す。図(a)の回路で，ベースのバイアス電流を一定にすると，負荷直線は，図(b)のように引ける。点Qは動作静止点である。入力信号が与えられて，動作静止点Qを中心に，Aから B まで変化すると，コレクタ電圧 v_{ce} の振幅はほぼ $\frac{V_{CC}}{2}$，コレクタ電流 i_c の振幅はほぼ I_{CQ} であるから，負荷抵抗 R_L に与えられる電力 P_o は，

$$P_o=\frac{\frac{V_{CC}}{2}}{\sqrt{2}}\cdot\frac{I_{CQ}}{\sqrt{2}}=\frac{1}{4}V_{CC}I_{CQ} \tag{26}$$

で与えられる。コレクタ電流 I_C は，I_{CQ} 点を中心にして，上下に対称に時間的に変化するから，コレクタ電流の平均値は I_{CQ} で，これはコレクタ電源から供給される。したがって，コレクタ電源 V_{CC} から供給される直流電力 P_{DC} は，

$$P_{DC}=V_{CC}I_{CQ} \tag{27}$$

P_o と P_{DC} の比を**電源効率**というが，これを η で表すと，

$$\eta=\frac{P_o}{P_{DC}}=\frac{\frac{1}{4}V_{CC}I_{CQ}}{V_{CC}I_{CQ}}=0.25\ (=25〔\%〕) \qquad (28)$$

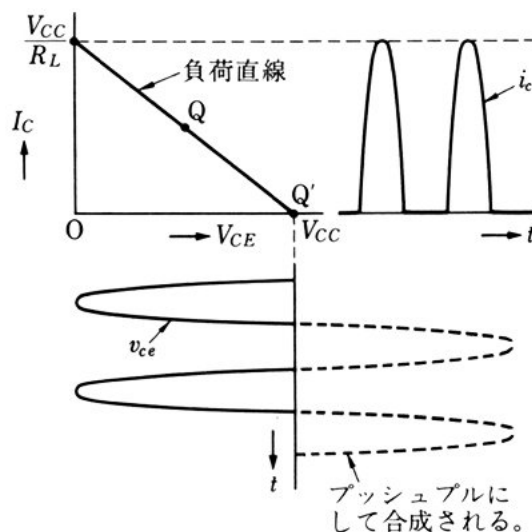
である。

負荷直線は，トランジスタの安全動作領域に収まっていなければならないので，この条件を満たすように，V_{CC}, I_C, R_L の値を決める必要がある。

図10に示した増幅回路では，コレクタ電流は，入力信号の1サイクルにわたって，つねに流れている。このような動作を**A級増幅**といい，出力波形は入力波形とほぼ同じで，ひずむことが少ない。

ベースのバイアス電流を0にすると，トランジスタに対する動作静止点は，図11のようにQ′点に移る。この状態で入力信号を加えると，図のように，コレクタ電流は半サイクルしか流れない。このような動作を**B級増幅**という。この場合，出力波形は入力波形と同じでなく，このままでは波形がひどくひずむので，B級増幅の動作は，p. 64で学ぶプッシュプル増幅回路に用いられる。QとQ′の中間に動作静止点を選んだものを**AB級増幅**という。

図11　B　級　増　幅

問 8. 出力電力以外の直流電源から供給された電力は，どこで失われているか。

（2） 変成器結合

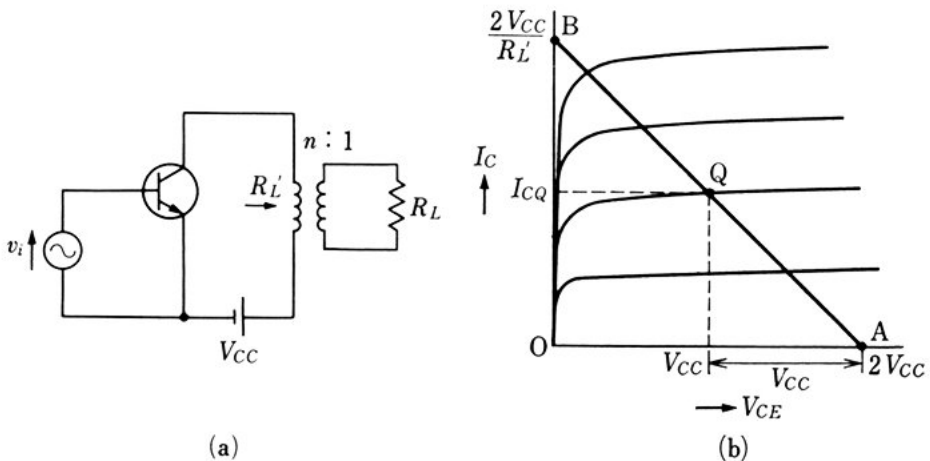
（1）電力増幅で学んだ増幅回路は，負荷抵抗の値が動作上決められてしまうが，実際に用いる負荷が，ちょうどこの値であるとは限らない。また，負荷で直流電力が消費される欠点がある。

5　図12(a)に示すように，負荷抵抗 R_L を巻数比 n の変成器を通して，トランジスタの出力に接続すると，一次側から R_L をみた抵抗 R_L' は n^2R_L となる。n を適当に選ぶことによって，トランジスタの負荷抵抗 R_L' の値を，最大出力が得られるように，ちょうど良い値にする（**整合をとる**）ことができる。また，負荷で直流電力は消
10　費されない。

変成器の巻線の直流抵抗を0とみなすと，トランジスタの動作状態は，図(b)で表される。巻線の直流抵抗を0と考えたので，入力信号のないときのコレクタ電圧・コレクタ電流は，それぞれ V_{CC}，I_{CQ} で表される。入力信号によって，動作点が負荷直線上をAから
15　Bの範囲で動くとすると，コレクタ電圧の振幅は V_{CC}，コレクタ電流の振幅は I_{CQ} であるから，負荷に与えられる電力 P_o は，

$$P_o=\frac{1}{2}V_{CC}I_{CQ} \qquad (29)$$

図 12　変成器結合増幅回路

(a)　(b)

となる。式(26)と式(29)とから，変成器結合を用いると，直接結合の場合に比べて，同じコレクタ電圧で2倍の出力が得られることがわかる。

コレクタ電源から供給される直流電力 P_{DC} は，式(27)と同じなので，

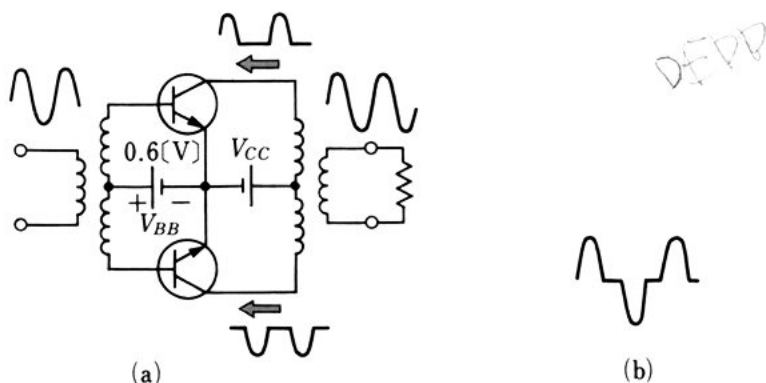
$$\eta=\frac{\frac{1}{2}V_{CC}I_{CQ}}{V_{CC}I_{CQ}}=0.50\ (=50[\%]) \qquad (30)$$

となり，電源効率は，直接結合の場合の2倍となる。

問 9． 変成器結合の特徴を述べよ。

(3) プッシュプル増幅回路

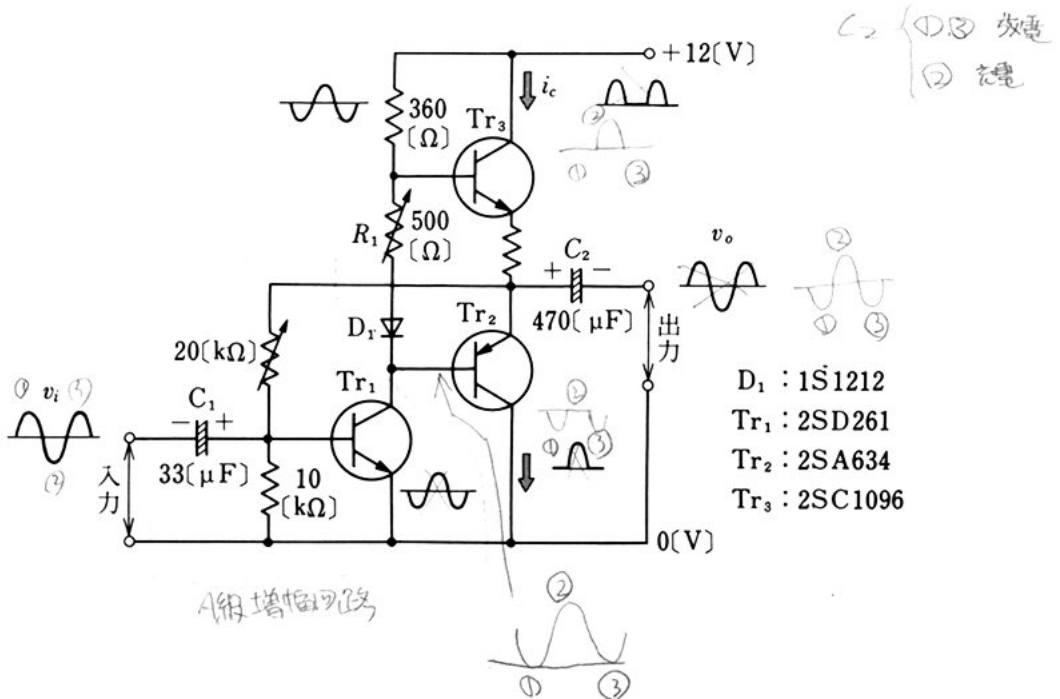
電力増幅回路でB級増幅とすれば，電源効率が良くなるので，電力増幅には，高効率でひずみを少なくできる**B級プッシュプル**(push-pull)**増幅回路**が用いられる。プッシュプル増幅回路は，入力電圧の正側と負側の振幅を，それぞれ二つのトランジスタに分担させて増幅し，再びこれを合成して出力とする方法である。図13(a)は，入力電圧を変成器によって分けてベースに加え，コレクタ電流は，変成器を通して合成する方法である。図(a)の V_{BB} が0であると，入

図 13　変成器結合B級プッシュプル増幅回路

力電圧の0の近くでコレクタ電流が流れないので，出力が図(b)のようになる。これを**クロスオーバひずみ**という。

（4） コンプリメンタリ回路

トランジスタの npn 形と pnp 形とでは，入力電圧の正負に対するコレクタ電流の増減が，ちょうど反対であり，増幅率などの特性のそろった一組のトランジスタでは，同じ入力電圧に対して，コレクタ電流の増減が，お互いに補い合うものがある。このような一組を**相補的**（**コンプリメンタリ**，complementary）という。

相補的な一組のトランジスタを使えば，図13のようにベース回路に変成器を用いて，逆位相の電圧を取り出さなくても，プッシュプルに動作させることができる。図14は，コンプリメンタリ増幅回路の例である。トランジスタ $\mathrm{Tr_1}$ のコレクタ側の出力が，ダイオード $\mathrm{D_1}$，抵抗 R_1 を通して，相補的なトランジスタ $\mathrm{Tr_2}$ と $\mathrm{Tr_3}$ に同じ位相の電圧が加えられている。また，図14では，出力変成器を用いずに，大きな結合コンデンサ C_2 で出力を合成するようになって

図 14　コンプリメンタリ SEPP 増幅回路

いる。このような回路を **SEPP** (single ended push-pull) **回路**といい，トランジスタの出力回路に，よく利用される。

問 10. A級増幅回路の電源効率が 25〔%〕を超えないことを示せ。

問　　題

1. トランジスタ増幅回路で，エミッタ接地・ベース接地・コレクタ接地とよばれる回路を説明し，それぞれの特徴を述べよ。

2. トランジスタ増幅回路の動作点は，どのようなことを考慮して決めるのがよいか。小振幅の場合と大振幅の場合について考えよ。

3. 図8の回路で，$R_E=1$〔kΩ〕，$R_L=3$〔kΩ〕とし，トランジスタの h 定数を $h_{fe}=100$，$h_{oe}=10^{-6}$〔S〕，$h_{ie}=500$〔Ω〕，$h_{re}=10^{-4}$ としたときの電圧増幅度を求めよ。また，$R_E=0$ としたときの電圧増幅度はいくらか。

4. 図9の回路で，$R_L=5$〔kΩ〕，$Z_F=10$〔kΩ〕とし，前問と同じトランジスタを用いると，電流増幅度はいくらになるか。

5. 負帰還増幅回路の動作原理を示し，その特徴を説明せよ。

6. A級電力増幅回路と，B級電力増幅回路との利点と欠点を比較せよ。

各種のトランジスタ回路

この節のねらい　通信装置では，高周波の交流を取り扱う。また，電子計算機や制御装置では，パルス波を取り扱う。この節では，このような高周波やパルス波を発生したり，増幅したりする回路について学ぶ。

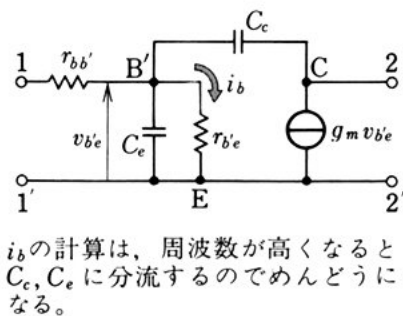
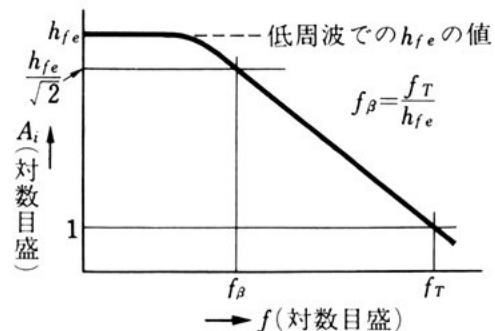
トランジスタ回路の構成技術は，印刷回路・集積回路・大規模集積回路と進んできた。これらの各種のトランジスタ回路と，回路構成技術について調べる。

1. 高周波回路

(1) 高周波でのトランジスタの働き

トランジスタの低い周波数に対する等価回路は，h 定数を用いて表してきた。しかし，高周波に対するトランジスタを，低周波の場合と同じように，h 定数を用いて表そうとすると，各 h 定数は，周波数の複雑な関数となって，取り扱いが不便である。このため，高周波におけるトランジスタの等価回路としては，図 1 (a) のよう

図 1　高周波でのトランジスタの働き

i_bの計算は，周波数が高くなると C_c, C_e に分流するのでめんどうになる。

(a)

(b)

な回路が用いられる。図の B′ 点は，トランジスタのベース内の仮想的な場所であり，$r_{bb'}$ は B′ 点とベース端子の間の抵抗，$r_{b'e}$ はベース内に注入される少数キャリヤによって起こるベース電流を表す抵抗である。また，ベース内での少数キャリヤの蓄積効果による作用を静電容量 C_e で表す。さらに，C_c はコレクタ・ベース間の空乏層の静電容量を表す。

エミッタ接合における電圧 $v_{b'e}$ が変化すると，ベースに流れ込む少数キャリヤが $v_{b'e}$ に比例して変化するので，コレクタ電流も $v_{b'e}$ に比例して変化する。この効果を図の定電流源 $g_m v_{b'e}$ で表している。

高周波等価回路は，h 定数を用いた低周波等価回路に比べて，はるかに複雑なので，高周波回路についての計算は，かなりめんどうである。

図1(a)に示した等価回路中のいくつかの定数は，低周波の h 定数と比較的簡単な関係をもっている。例えば，

$$g_m r_{b'e} = h_{fe}, \qquad r_{bb'} = h_{ie} - r_{b'e}$$

である。

エミッタ接地増幅回路の電流増幅度は，C_c や C_e の静電容量が影響して，周波数が高くなると低下する。電流増幅度が，低周波の場合の $\frac{1}{\sqrt{2}}$ に低下する周波数を f_β とすると，f_β は，

$$f_\beta = \frac{1}{2\pi r_{b'e}(C_e + C_c)}$$

で与えられる。また，電流増幅度が1に低下する周波数，つまり電流増幅が行われなくなる周波数を f_T とすると，f_T は，

$$f_T \fallingdotseq \frac{g_m}{2\pi(C_e + C_c)} \fallingdotseq h_{fe} f_\beta$$

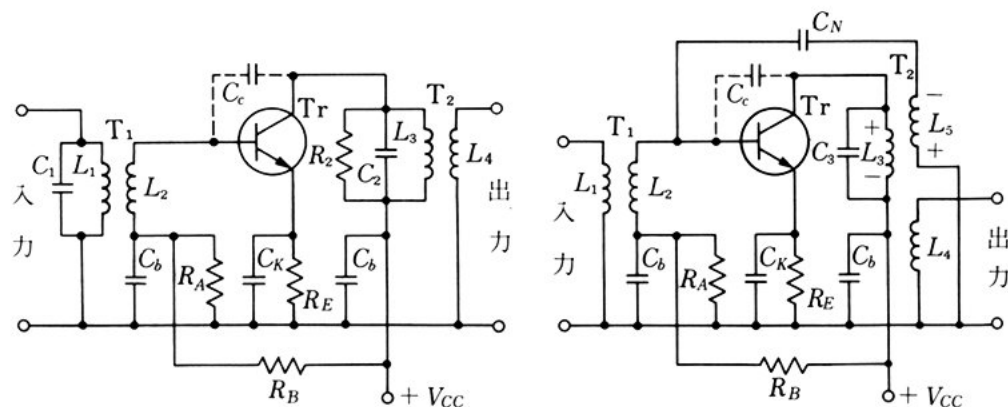
で与えられる。f_β と f_T の関係を図1(b)に示す。

（2） 高周波増幅回路

高周波増幅回路では，ある決まった周波数付近の信号だけ増幅すればよいので，ベースやコレクタには，コイルとコンデンサの共振回路を用いる。トランジスタ自体のもつ等価入力容量や等価出力容量も，共振回路を構成する静電容量の一部となる。

高周波増幅回路の例を図2に示す。図のコンデンサ C_b は，信号周波数に対して，じゅうぶん小さいリアクタンスをもつので，信号に対しては，短絡回路として働くバイパスコンデンサである。この回路では，トランジスタのもつ静電容量 C_c を通して，出力信号の一部が入力回路に帰還される。ある周波数では，この帰還が正帰還となるので，増幅度が大きいと，増幅動作が不安定になったり，発振を起こしたりする。これを避けるには，図の抵抗 R_2 を小さくすることにより，1段当たりの電圧増幅度を低くし，多段増幅して必要な増幅度を得るのがふつうである。

また，図3のように，出力回路のコイルの二次巻線から逆位相の電圧をとり，適当な値の C_N を通して入力回路に加え，C_c による

図 2　高周波増幅回路　　図 3　中和回路

Tr：2SC 710，　T_1, T_2：10.7〔MHz〕用，　V_{CC}=10〔V〕，　R_A=4.7〔kΩ〕，　R_B=15〔kΩ〕，　R_2=6.8〔kΩ〕，　R_E=1〔kΩ〕，　C_K=C_b=0.01〔μF〕，　C_1=C_2=100〔pF〕，　C_N=1～5〔pF〕

コレクタ側からの帰還を打ち消す方法もある。これを**中和法**という。

すでに，増幅回路の動作にA級・AB級およびB級があることを学んだが，ベースのバイアス電流を，B級の場合よりさらに負に選んで動作させることを**C級増幅**という。C級増幅では，コレクタ電流は，入力信号の半サイクルより短い時間しか流れないので，出力電流の波形は非常にひずむが，電源効率はB級より良い。

高周波増幅では，コレクタに共振回路を接続し，入力信号と同じ周波数の出力信号を取り出すので，C級増幅を用いて，電源効率を高めることができる。

（3） 変 調 回 路

電気通信において，送りたい情報と同じ波形をもつ電気信号を**信号波**という。高い周波数の正弦波の振幅や周波数を，信号波に応じて変化させる操作を**変調**という。変調に用いる高周波正弦波を**搬送波**，また，搬送波を信号波に応じて変化させた信号を**変調波**という。

非線形回路　理想的な増幅回路は，入力信号の振幅の変化に比例して，出力信号の振幅も変化する特性をもっている。このような増幅回路に，周波数がそれぞれf_0とf_sである二つの信号を加えたとすると，出力にはやはりf_0とf_sの周波数をもつ二つの信号が現れるだけである。

しかし，回路のうちには，例えば整流回路のように，出力信号の振幅変化が，入力信号の振幅変化に比例しないような特性をもつものがある。このような回路を**非線形回路**という。非線形回路には，f_0とf_sの周波数をもつ二つの信号を加えると，出力には周波数f_0とf_sの二つの信号のほかに，両周波数の和f_0+f_s，両周波数の差f_0-f_sなどの周波数をもつ多くの信号が生ずるという性質がある。

この性質は，ここで学ぶ変調回路，p. 72で学ぶ復調回路におい

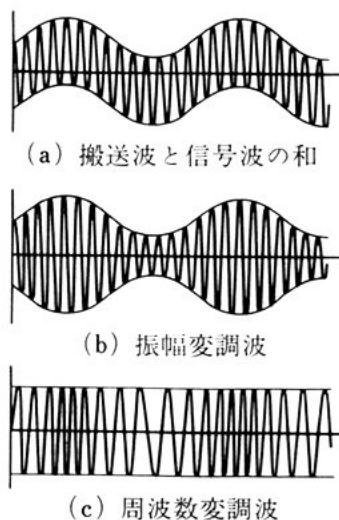
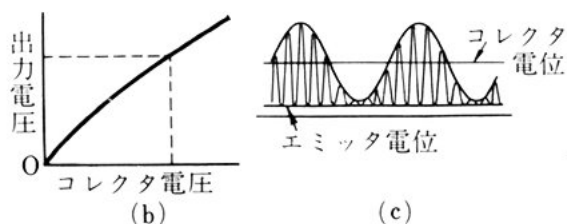
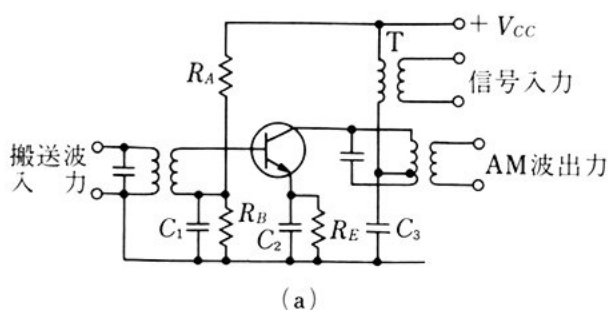



図4 変調波の波形　　**図5 コレクタ変調回路**

て重要な性質である。

振幅変調回路　搬送波の振幅を信号波の波形に応じて変化させて得られる変調波を**振幅変調波**といい，振幅変調波を得る操作を**振幅変調**(amplitude modulation: **AM**)という。

搬送波の周波数を f_0，信号波の周波数を f_s としたとき，搬送波と信号波を加え合わせたときの波形を図4(a)に，搬送波を信号波で振幅変調したときの波形を図(b)に示す。図(b)の波形は，それぞれ f_0, f_0+f_s および f_0-f_s の周波数をもつ成分からできている。したがって，図(a)のような波形の信号から，図(b)のような波形の信号を作りだすには，非線形回路を用いることが必要である。

図5(a)は，搬送波入力の高周波増幅回路であり，コレクタ電圧に対する出力電圧の関係は，図(b)のようになっている。コレクタ回路に，変成器を通して信号波が加えられると，コレクタ電圧が変化するので，図(c)のように，振幅変調波が得られる。出力波形はひずんでいるが，搬送波だけを通すフィルタ回路を通すことによって，高調波成分は除去することができる。

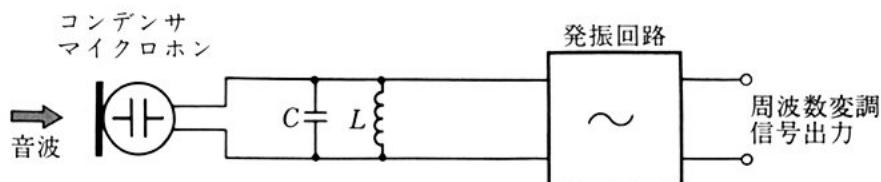



図 6 周波数変調回路

問 1. 図5(c)に示すコレクタ電圧波形は，図4(a)と図(b)のどちらの波形に近いか。また，どこが違うか。

周波数変調回路 搬送波の周波数を，信号波に応じて変化させて得られる変調波を**周波数変調波**といい，周波数変調波を得る操作を**周波数変調**（frequency modulation: **FM**）という。周波数変調波の波形を図4(c)に示す。

周波数変調波を得る回路は，いろいろあるが，最も簡単な回路を図6に示す。発振回路の発振周波数は，ほぼ図のコイルL，コンデンサマイクロホンの静電容量，およびコンデンサCで構成される並列共振回路の共振周波数に等しい。コンデンサマイクロホンに音波を当てると，マイクロホンの静電容量が音波に応じて変化し，周波数変調波が，発振回路の出力として得られる。

（4） 復 調 回 路

変調波信号から信号波を取り出す操作を**復調**（demodulation），または**検波**（detection）という。

搬送波の周波数をf_0，信号波の周波数をf_sとすると，振幅変調波の周波数成分はf_0, f_0+f_sおよびf_0-f_sである。したがって，振幅変調波を非線形回路に加え，その出力から，フィルタ回路によって，f_0付近の周波数をもつ成分を除くと，周波数f_sの信号波が取り出せる。周波数変調波は，振幅変調波に変換してから復調する。

直線検波 ダイオードなどの整流作用を用いるもので，図7(a)

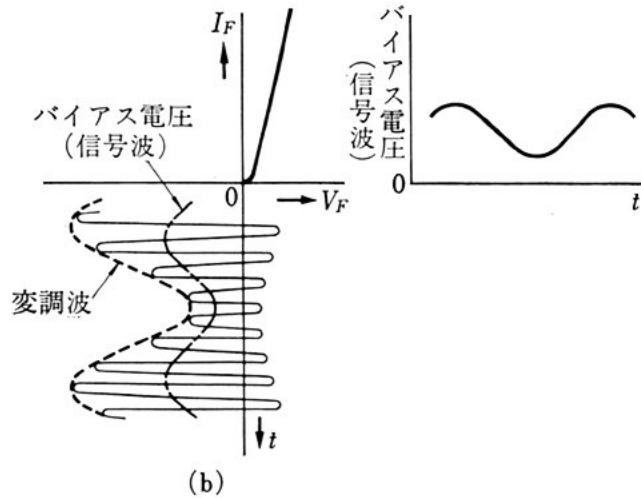
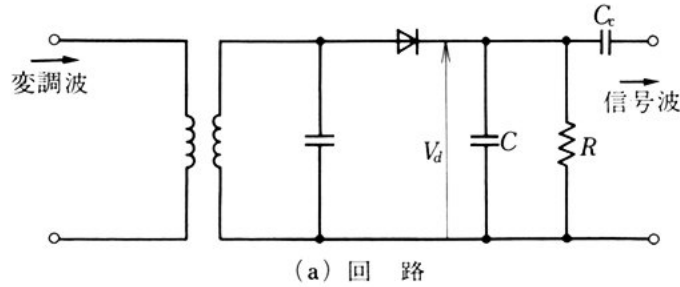
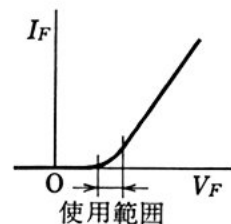



図 7　直線検波回路

は，ダイオードを用いた直線検波回路である。図のように変調波が加わると，回路のダイオードの整流作用と，CR 回路の充放電特性によって，抵抗 R の両端に，図(b)のように，変調波の振幅とほぼ同じ形の信号波と，直流分の重なった電圧 V_d が現れる。結合コンデンサ C_c で，この直流分を取り除くと，信号波が得られる。この回路は，大きな入力電圧を必要とするが，ひずみが少なく，回路も簡単なので，振幅変調波の復調によく用いられる。

図 8　二乗検波の使用範囲

二乗検波　ダイオードの電圧－電流特性のO点付近を拡大して示すと，図8のような曲線になっている。入力信号の振幅が

小さいと，検波は特性のこの部分に従って行われ，直線検波とならず，出力波形がひずむ。

このような特性をうまく利用することによって，入力信号の振幅の2乗や対数に比例した振幅をもつ出力信号を得ることができるので，測定器の回路などに利用される。

ヘテロダイン検波　高周波信号を増幅する場合，増幅度を大きくすると，出力段からの正帰還のため，回路が不安定になる。これを避けるため，受信した変調波を増幅した後，その搬送波の周波数だけを，いちど搬送波と信号波の中間の周波数に変換して増幅し，その後に復調回路で信号波を取り出すことが行われる。このような検波を**ヘテロダイン検波**，このような操作を**周波数変換**，変換された周波数を**中間周波数**という。

このような検波の方法は，第4，5章で学ぶように，ラジオ・テレビジョン・通信機などに，広く利用される。

2. 発 振 回 路

増幅された出力の一部を入力側にもどして加えると，正弦波を初め，いろいろな波形の出力を発生させることができる。このような働きをする回路を**発振回路**という。

(1) *LC* 発 振 回 路

図9(a)のように，コンデンサ C に電荷を与えてスイッチSを閉じると，回路の電流や電圧は，図(b)のように振動する。しかし，回路には損失があるから，振動は時間とともに減衰する。

一定振幅の正弦波振動を得るためには，振動回路と並列に負性コンダクタンスを接続するか，または振動の周期にあわせて，振動回路

(a)

(b)

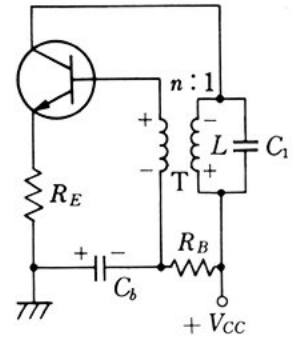
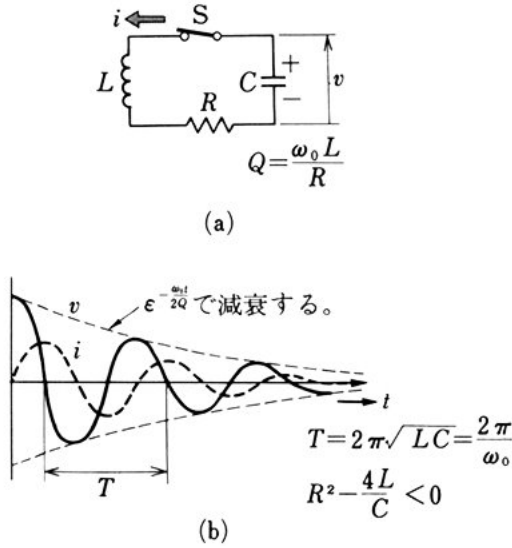



図 9　振動回路と振動電流・振動電圧

図 10　コレクタ同調形発振回路

に電源から電流を流してやることが必要である。図10の回路で，振動回路の周期に一致した電圧を結合変成器 T の二次巻線から取り出し，図のような極性で，振動回路の電流を補うようにトランジスタのコレクタ電流を流せば，一定振幅の正弦波が得られる。このときの発振周波数は，$f \fallingdotseq \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$〔Hz〕である。二次巻線の極性が逆であると発振しない。C_b はバイパスコンデンサである。

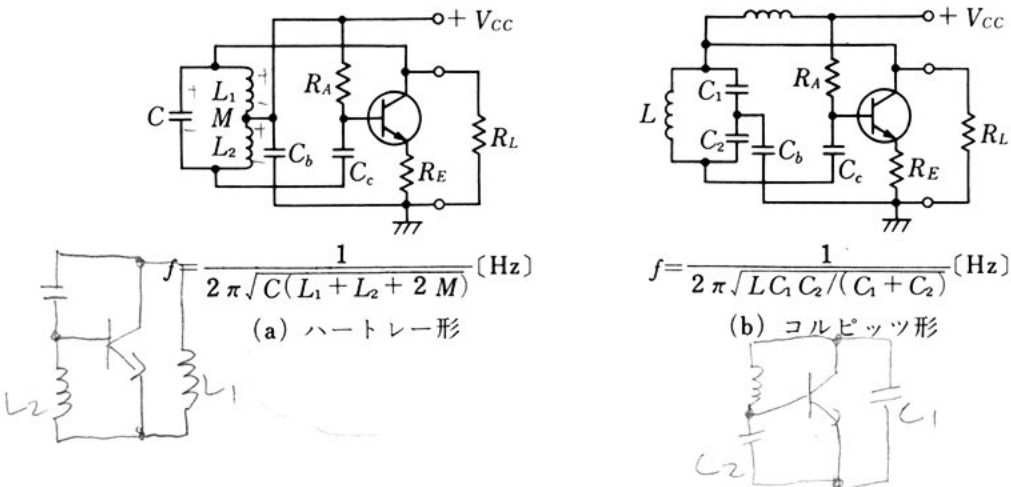
図10の回路は，L と C を用いているので，**LC 発振回路**という。

図 11　LC 発振回路の例

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{C(L_1+L_2+2M)}}\text{〔Hz〕}$$

(a) ハートレー形

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1C_2/(C_1+C_2)}}\text{〔Hz〕}$$

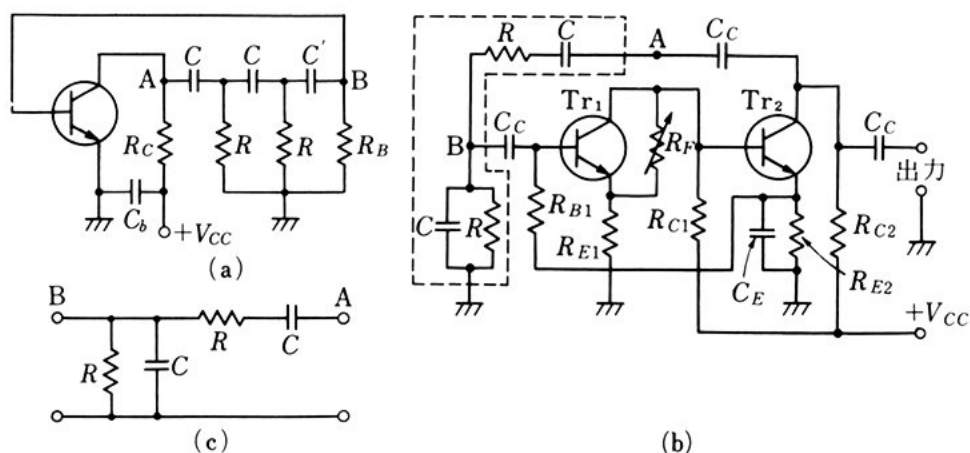
(b) コルピッツ形

LC 発振回路の他の例を図 11 に示す。LC 発振回路の発振周波数は，振動回路の共振周波数にほぼ等しい。図 (a)，(b) において，ベースとコレクタの交流電圧波形は，逆位相になっている。

問 2． 図 10 に示す発振回路で，$L=800$〔μH〕，$C_1=200$〔pF〕のとき，発振周波数を求めよ。

(2)　CR 発振回路

L と C の代わりに，C と R を用いて発振回路を構成することができる。その例を図 12 に示す。図 (a) で，A 点と B 点の交流電圧の波形は逆位相になっているが，B 点の交流電圧は A 点の交流電圧の数十分の 1 なので，トランジスタの電圧増幅度をじゅうぶん大きくしなければ発振しない。したがって，h_{fe} の大きいトランジスタを用いなければならない。

図 (b) は，2 段増幅回路の出力電圧の一部を，初段のトランジスタに正帰還することによって，発振させる回路の例である。図の破線

図 12　CR 発振回路

Tr_1, Tr_2：2SC 945，$V_{CC}=9$〔V〕，$R_{B1}=860$〔kΩ〕，$R_{C1}=10$〔kΩ〕，$R_{C2}=5$〔kΩ〕，$R_{E1}=1$〔kΩ〕，$R_{E2}=3$〔kΩ〕，$R_F=3$〔kΩ〕くらい，$C_C=10$〔μF〕，$C_E=30$〔μF〕

で囲んだ部分を取り出して，図(c)に示す。図(c)で，A点に一定電圧を加え，周波数を変えていくと，

$$f_0=\frac{1}{2\pi CR} \qquad (1)$$

で与えられる周波数で，B点の電圧は最大となり，A点とB点の電圧は，周波数 f_0 でだけ同位相となる。

図(b)の回路は，抵抗 R_F と R_{E1} によって，トランジスタ Tr_2 のコレクタからトランジスタ Tr_1 のエミッタに負帰還されている。ところで，式（1）で与えられる周波数 f_0 においては，トランジスタ Tr_2 からトランジスタ Tr_1 への正帰還が行われて，正帰還量が負帰還量より大きくなるので，図(b)の回路は周波数 f_0 で発振する。

図12のような回路を ***CR* 発振回路**といい，低周波発振器としてよく用いられる。

問 3. 図12(b)に示す CR 発振回路で，$C=0.01$〔μF〕，$R=150$〔kΩ〕のとき，発振周波数を求めよ。

（3） 水晶発振回路

電気通信には，周波数の安定していることが要求され，音さや水晶などの振動子を用いた周波数の安定した発振回路が用いられる。

特殊な切り方をした水晶片に圧縮力や引張力を加えると，図13(a)のように表面に電荷が現れ，また，図(b)のように電圧を加えると水晶片が変形する。これを**圧電現象**という。

水晶振動子は，2枚の電極で水晶片をはさんだ構造で，この電極に加える電源の周波数を変え，水晶片の固有振動数に近づけると，水晶片の振動が大きくなり，流れる電流が大きくなる。電気的には図13(c)に示す等価回路のように働き，振動子が $f=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ で直列共振を起こしていると考えられ，そのリアクタンスは図(c)のよ

(a) 力を加えると電荷が発生　(b) 電圧を加えると変形

水晶片の圧電現象

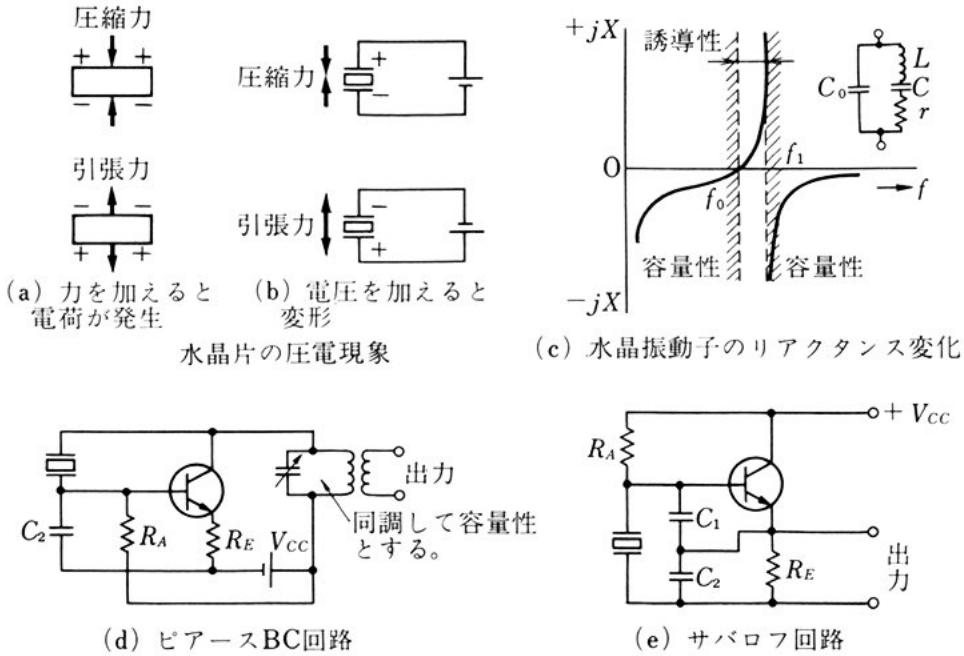
(c) 水晶振動子のリアクタンス変化

(d) ピアースBC回路　(e) サバロフ回路

図 13　水晶発振回路

うに，共振周波数付近で大きく変化し，L や C の電気回路では望めないほど高い Q (≒10^4 以上) が得られる。図 11 (b) の L の代わりに水晶振動子を用いると，図 13 (d) のピアース BC 回路とよばれる発振回路が得られる。図 (e) のサバロフ回路もよく使われる。

水晶振動子は，0.04～20〔MHz〕が実用的な動作周波数であるが，高次振動を利用して 200〔MHz〕程度まで用いられる。また，水晶振動子は，温度にも安定であるので，周波数変動率は 1〔°C〕当たり 10^{-5}～10^{-8} である。発振周波数を変えるには，水晶振動子を取り換える。

(4)　ブロッキング発振回路

図 10 の LC 発振回路の巻数比 n を大きくすると，ベース電圧が正となる瞬間にはベース電流，したがってコレクタ電流が流れるが，コレクタからベースへの正の帰還作用によって大きなベース電流が流れ，コンデンサ C_b を図の極性で急激に充電するので，短時間の

間にベース電流は流れなくなる。これを**ブロッキング**という。

コレクタ回路には，短時間の間だけパルス電流が流れ，LC_1 回路の過渡現象のように振動が起こり，やがてコレクタ電圧は電源電圧に近い値にもどる。C_bR_B の時定数が，この振動の周期に比べてはるかに大きければ，C_b 両端の負電圧はゆっくり減少する。C_b の電圧が負の間は，コレクタはしゃ断の状態にあるが，C_b の両端の電圧が減じ，ベース電流が流れるようになると，急にコレクタ電流が流れて，再び上のような動作が繰り返される。したがって，コレクタには，C_bR_B の時定数で定まる周期でパルス波形が得られる。これを**ブロッキング発振**（blocking oscillation）といい，このような発振回路を**ブロッキング発振回路**という。この発振回路は，パルスやのこぎり波形を発生する回路によく用いられる。

3. スイッチ回路

入力信号に対して，トランジスタが導通またはしゃ断の二つの状態だけをとる回路を**スイッチ回路**という。

（1） トランジスタのスイッチ動作

図 14 (a) のように，電源 V_{CC} と負荷抵抗 R_L に直列に入ったスイッチ S が，この回路の導通（**オン状態**）としゃ断（**オフ状態**）を行う

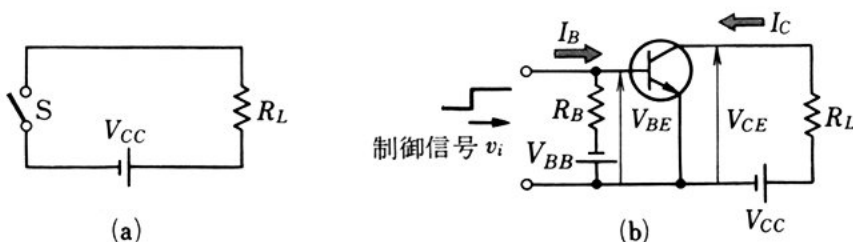
図 14 トランジスタスイッチ回路

が，これを**スイッチング**という。図(b)の回路は，エミッタ接地増幅回路と同じ形であるが，ベースは V_{BB} で負にバイアスされている。したがって，トランジスタは，入力信号がないと電流が流れない状態を保っている。ところが図のような正の電圧が加わると導通する。すなわち，図のような制御信号によって，コレクタ電流がオン・オフされ，スイッチングを行う。

図14(b)のトランジスタの動作点は，トランジスタの特性が図15のようであれば，入力信号がないとき，V_{CE}-I_C 特性曲線のA点にあり，わずかしか流れない。したがって，V_{CE} はほぼ電源電圧 V_{CC} に等しい。ベースに正の制御信号を加えると，ベース電流 I_B の増加とともにコレクタ電流 I_C は，増幅回路の場合のように，負荷抵抗 R_L を通して図15の負荷直線ABCに沿って増加する。制御信号によるベース電流が120〔mA〕以下であれば，負荷に流れる電流の大きさは，制御信号の大きさに比例し，トランジスタは**活性領域**にあるという。ベース電流が120〔mA〕以上であると，動作点はC点になり，それ以上 I_B を増してもコレクタ電流は増さず，コレクタ電圧も変化しない。このような状態をトランジスタの動作が**飽和状態**にあるといい，そのときの V_{CE} を**飽和電圧 V_S** という。オン状態ではつねに飽和状態にあるように構成した場合を**飽和形スイッチ**といい，出力波形も一定であり，電源効率も高いのでよく用いられる。しかし，飽和状態からオフ状態に移る

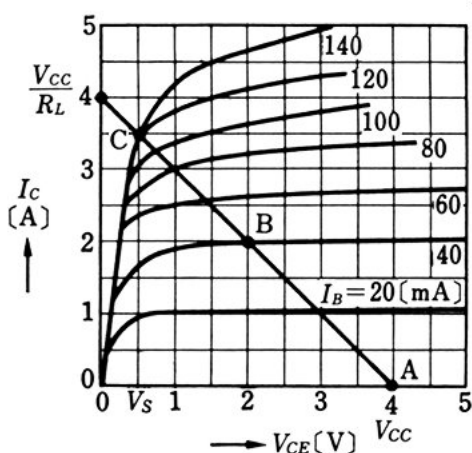



図15　トランジスタ(2SD217)の V_{CE}-I_C 特性と負荷直線

場合，ベースに過分に注入されていたキャリヤの蓄積効果のため，スイッチ時間に遅れを生ずる。

オン状態でもまだ活性領域にある場合を**不飽和形スイッチ**といい，スイッチ速度は優れているが，入力の大きさで出力が変化する。これを避けるため，不飽和形ではp. 83で学ぶクランプ回路を用いるなどの方法が用いられる。

トランジスタスイッチ回路は，開閉の速度がきわめて速いこと，開閉の制御に要する電力が非常に少ないことなど，機械的スイッチでは得られない利点がある。

(2) トランジスタスイッチ回路のパルス応答

図14(b)のトランジスタスイッチ回路の制御信号として，図16(a)のような方形波パルス v_i が加わったとき，トランジスタのベース電流 I_B，コレクタ電流 I_C，およびコレクタ電圧 V_{CE} は，それぞれ図16(b)，(c)，(d)のようになる。I_C が v_i と同じ形にならない理由を考えよう。

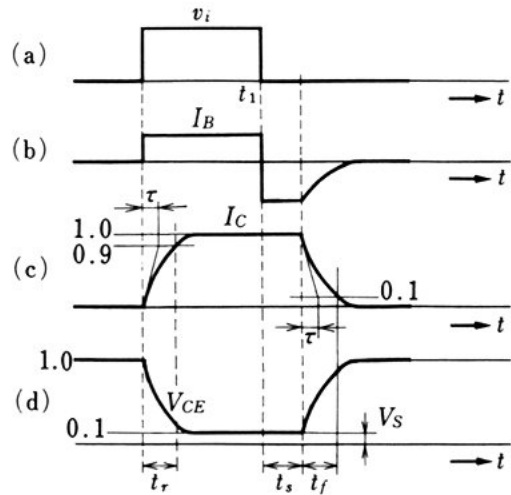



図 16　トランジスタスイッチ回路のパルス応答

I_C の立上り部分では，トランジスタの動作の時間的遅れのため，ほぼ指数関数に従って増大する。遅れ時間 t_r は，I_C が最終値の90〔%〕の値になるまでの時間である。トランジスタ増幅回路の上限周波数を f_2 とすれば，立上りの時定数 τ はほぼ $\dfrac{1}{2\pi f_2}$ で与えられ，t_r はその約2.2倍となる。すなわち，$t_r \fallingdotseq \dfrac{0.35}{f_2}$ である。立下りの遅れ時間 t_f も同じように，

初期値からその10〔%〕の値に低下する時間である。ふつう $t_r=t_f$ である。

図(b)のベース電流の波形は，v_i が0になってから，t_s の時間だけ逆向きの電流，すなわち，キャリヤの蓄積効果によって，ベースから電流が流れ出すことを示す。

飽和スイッチ回路では，この蓄積されたキャリヤが速く流れ出すようにベース回路の抵抗を小さくするとか，用いるトランジスタの蓄積効果を少なくする，などの工夫をしている。

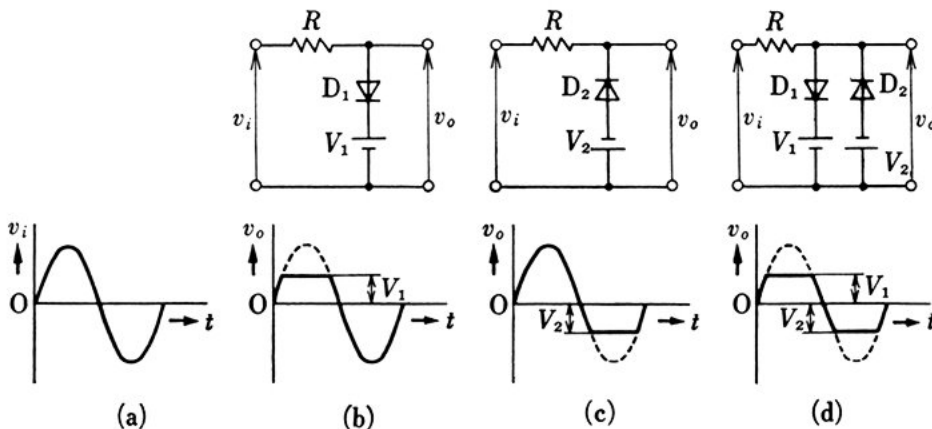
問 4. 図16で，t_s を小さくするためには，どのようにすればよいか。

問 5. 図16で，立上りや立下りが，指数関数に従って変化するとして，指数関数のグラフをかき，最終値の90〔%〕になるまでの時間と，時定数との関係を調べよ。

4. 波形整形回路

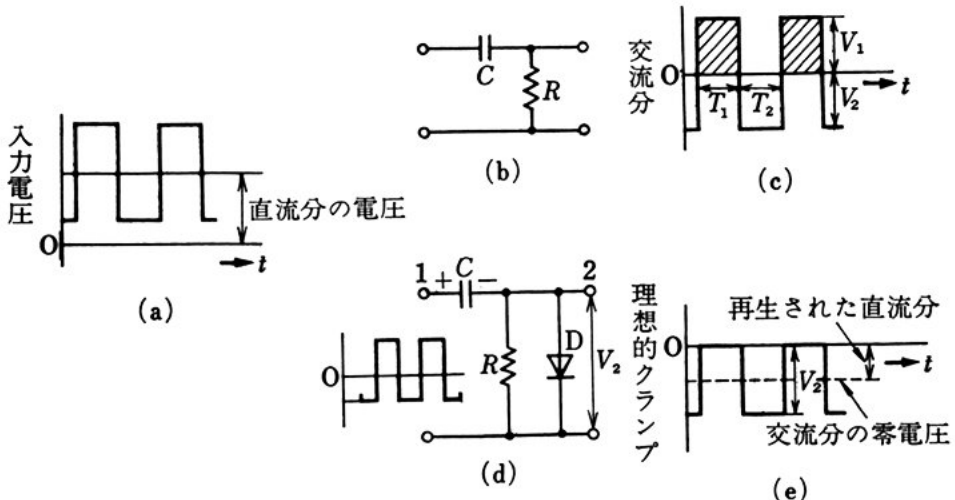
(1) クリップ回路

図17(b)の回路に図(a)の波形 v_i が加わったとき，入力 v_i の電圧が電池の電圧 V_1 以上になると，ダイオード D_1 が導通状態にな

図 17 ダイオードによるクリップ回路

るので，出力 v_o は一定電圧 V_1 に保たれ，図(b)の波形が得られる。これを，波形 v_i が電圧 V_1 で**クリップされた**という。図(c)では，負の電圧 $-V_2$ 以下がクリップされる。図(d)のように組み合わせると，$+V_1$ と $-V_2$ でクリップされ，波形は $+V_1$ と $-V_2$ の間に
5 **リミットされた**という。

(2) クランプ回路

図18(a)のような直流分を含んだ波形は，図(b)のコンデンサ C を通すと，直流分はなくなり，図(c)のように，横軸の上下の部分が等しい位置にずれた波形になる。そこで，図(d)のように，ダイ
10 オードDを接続した回路の端子1に，図(c)の波形を加えると，波形の正の部分ではダイオードに電流が流れ，コンデンサ C は図(d)のような極性で充電され，端子2は零電圧に保たれる。また，波形が負の範囲では，この電圧とコンデンサの負電圧が加わり合って端子2に現れるので，端子2の波形は，パルスの上端が零電圧に固定
15 された波形となる。ダイオードDの向きを逆にすると，波形の下端が零電圧に固定される。

図18 クランプ

このように，波形の上端または下端を，ある決まった電圧に固定することを**クランプ**といい，この回路を**クランプ回路**という。

問 6. 図18(c)に示すパルス波形の直流分は，パルス幅 T_1, T_2 とどんな関係にあるか。

(3) マルチバイブレータ

マルチバイブレータは，図19のように，二つのトランジスタの入出力間を Z_1, Z_2 で結合した回路で，Z_1 や Z_2 には抵抗やコンデンサが用いられる。

双安定マルチバイブレータ　図19で，A点に正のパルス信号を加えて Tr_1 をオン状態にすれば，Tr_1 のコレクタと Tr_2 のベースの電位はほとんど0となるので，Tr_2 はオフ状態となり，Tr_2 のコレクタ電位がほぼ V_{CC} であって，Tr_1 のベース電位は Tr_1 を飽和状態に保つことになる。結合素子のインピーダンス Z_1, Z_2 が抵抗 R_1, R_2 ならば，Tr_1 のベースには R_{B1} と $(R_{C2}+R_2)$ を通してベース電流が流れているから，いつまでも Tr_1 がオン状態で，Tr_2 がオフ状態を保っている。

もし，B点から Tr_2 のベース電流を流すような正のパルス信号を

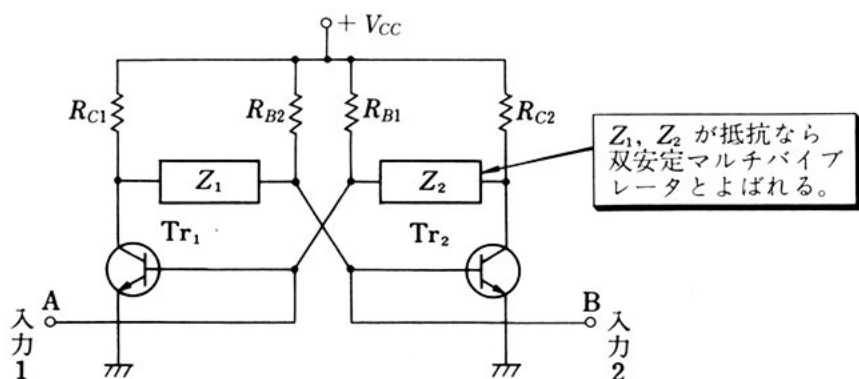



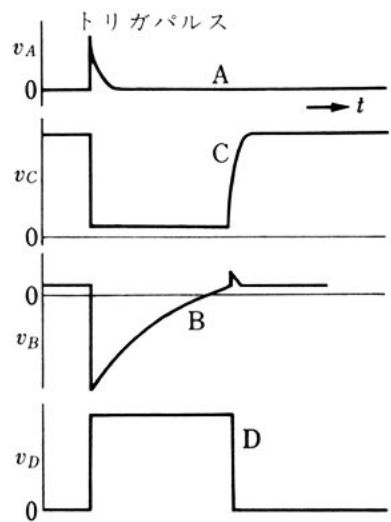
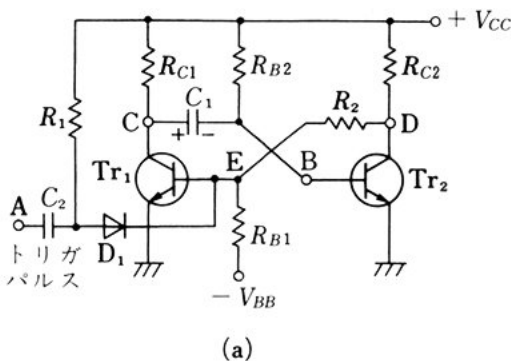
図 19　マルチバイブレータ

加えると，Tr_2 が導通し始め，Tr_1 のベース電位が低くなるので，Tr_1 のコレクタ電流が減少し，Tr_2 のベース電位は上昇する。したがって，Tr_2 のコレクタ電流は増加して，Tr_1 のベース電位を下げるので，Tr_1 はたちまちオフ状態に移ってしまう。このように，結合素子が抵抗であるようなマルチバイブレータは，一方がオン状態で，他方がオフ状態であるような二つの状態をいつまでも保ち，ベースに正のパルス信号が加えられるたびに，オン状態とオフ状態の交換を繰り返す。このように動作する回路を**双安定マルチバイブレータ**（**フリップフロップ回路**ともいう）といい，切り換えに加えられたパルスを**トリガパルス**という。

双安定マルチバイブレータは，電子計算機の計数器やレジスタなどの回路に用いられる。

単安定マルチバイブレータ　図 20 (a) のように，図 19 の Z_1 が静電容量 C_1 で，Z_2 が抵抗 R_2 であれば，Tr_1 のベースに負，Tr_2 のベースに正の電圧が加わるので，Tr_1 がオフ状態，Tr_2 がオン状態

図 20　単安定マルチバイブレータ

(a)

Tr_1, Tr_2：2SC 945，$-V_{BB}=-2$〔V〕，
$+V_{CC}=10$〔V〕，$R_1=100$〔kΩ〕，
$R_2=50$〔kΩ〕，$R_{C1}=R_{C2}=5$〔kΩ〕，
$R_{B1}=30$〔kΩ〕，$R_{B2}=50$〔kΩ〕

(b) 各点の波形

で安定である。このときの C_1 はほぼ V_{CC} の電圧で図の極性に充電されている。ここで，A端子に正のトリガパルスを加えたとき，Tr_1 はオン状態になり，C点の電位が下がり，Tr_2 のベースには C_1 の電圧が加わるので，Tr_2 がオフ状態になる。C_1 の電荷は Tr_1，電源 V_{CC}, R_{B2} を通して放電し，ほぼ時定数 C_1R_{B2} の時間の後，Tr_2 は再びオン状態にもどる。このような回路は**単安定マルチバイブレータ**とよばれ，一定幅のパルスを得るのに用いられる。

無安定マルチバイブレータ　図19の Z_1, Z_2 が静電容量 C_1, C_2 であるときには，もし Tr_1 がオン状態で Tr_2 がオフ状態であれば，C_1 は R_{B2} を通して充電され，Tr_2 のベース電位は上昇する。この電位が Tr_2 をオン状態にするほどになると，Tr_2 のコレクタ電位が低くなり，したがって，Tr_1 のベース電位も低くなり，Tr_1 の電流を減少させるようになって，Tr_1 のコレクタ電位が高くなる。この変化は，C_1 を通してトリガパルスが加わったときのように，たちまち Tr_2 をオン状態にし，Tr_1 はオフ状態となる。図20のときと同様に，繰り返しの周期は静電容量 C_1, C_2 の放電の周期で決まり，$C_1R_{B1}+C_2R_{B2}$ の時定数に比例するような周期で二つの状態が変化し，方形波が発生する。このような回路を**無安定マルチバイブレータ**という。

無安定マルチバイブレータは，方形波やパルスを発生する回路に用いられる。

（4） のこぎり波形の発生

図21(a)の方形波を図(b)のような積分回路に加えると，コンデンサの充放電が繰り返されて，図(c)のような波形の電圧が得られる。CR の時定数を大きくすると，出力電圧 v_o の振幅は小さくなるが，波形の曲がりが少なくなって，図(d)の三角波が得られる。

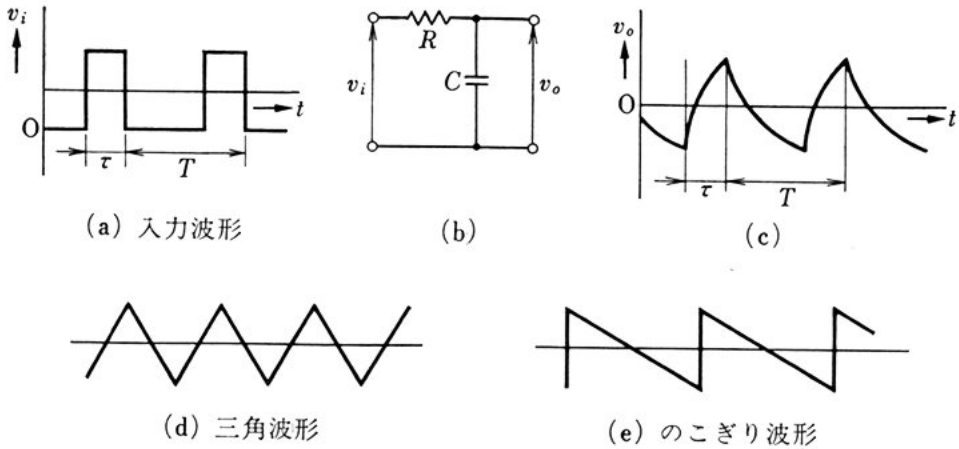
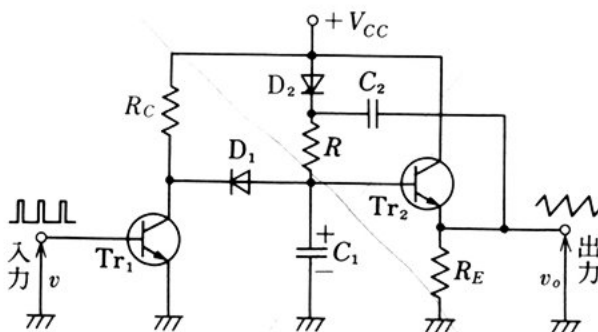



図 21 のこぎり波形

周期 T に比べて幅 τ の小さいパルスを用いると，図(c)で τ が短くなって，波形は図(e)のようなのこぎり波形に近づく。

積分回路の C の充電電圧は指数関数に従って曲がるが，これは，コンデンサが充電されて電圧が高くなると，充電電流が減少するためである。充電されて高くなっただけ電源電圧を高くしてやれば，特性の直線性は良くなる。この原理を用いてのこぎり波形を発生する方法に，図 22 に示す**ブートストラップ回路**がある。Tr_1 がオン状態のときは，C_1 の電荷は低い抵抗をもつ D_1, Tr_1 を通して短時間に放電される。Tr_1 がオフ状態になると，C_1 は電源から D_2, R を通し

図 22 ブートストラップ回路

Tr_1, Tr_2：2SC 945,
$+V_{CC}$=10〔V〕,
C_1=0.01〔μF〕,
C_2=60〔μF〕,
R=5〔kΩ〕,
R_C=100〔kΩ〕,
R_E=10〔kΩ〕

て充電され，C_1R の時定数で電圧が高くなる。Tr_2 の R_E 両端の電圧はほぼ C_1 の両端の電圧に等しく，この電圧は C_2 を通して電源電圧に加わるので，C_1 の電圧は直線的に増加する。

5. 集積回路

電子技術が進歩するにつれ，一つの電子機器を構成する部品の数は急激に増加し，電子計算機などは，1台に10万個以上もの部品が用いられている。このような多数の部品を導線で接続することは，あまりにも手数がかかりすぎる。このため，各部品を絶縁基板の上に配置し，写真技術と化学作用を利用して，すべての配線を同時に完了するプリント基板の技術が開発された。しかし，プリント基板は，個々の部品の容積を小さくして，機器を小形化するには，あまり有効な技術ではない。

集積回路という技術の開発は，トランジスタの製造技術の進歩が基本となっている。集積回路は，きわめて小さい半導体の薄板をもとにして作られる。この薄板を**基板**という。

基板としてp形基板を用い，図23(a)のように，基板の上面にn形層を成長させる。このn形層は，トランジスタのコレクタになる。さらにその上面に酸化けい素の薄膜を形成させる。次に，図(b)のように，写真技術を利用して酸化けい素膜の一部を除いて窓を作り，上面からp形不純物を拡散させた後，再び窓に酸化けい素膜を蒸着させる。次に，図(c)のように，新しい窓からp形不純物を拡散させる。この領域は，トランジスタのベース領域，ダイオードの陽極，抵抗などになる領域である。

図(d)のように，新しい窓からn形不純物を拡散させて，トラン

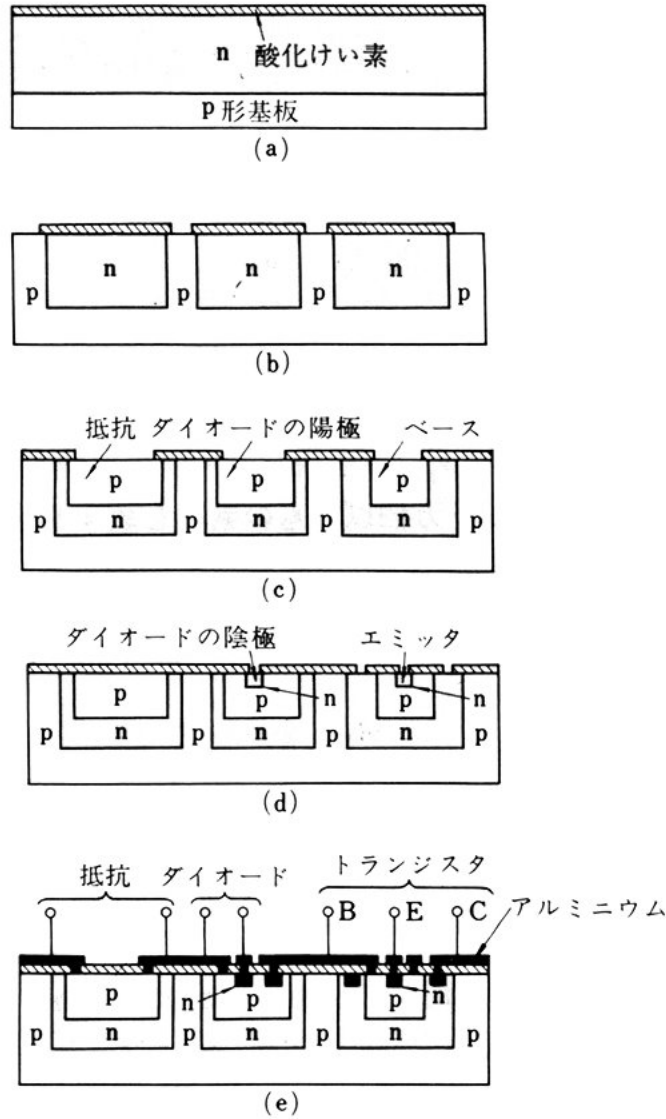



図 23 集 積 回 路

ジスタのエミッタ領域，ダイオードの陰極を作る。

再度，酸化けい素膜を蒸着して新しい窓を作り，そこからアルミニウムを真空蒸着して，トランジスタ・ダイオードの各電極と抵抗端子の結線を完成する。

5　図(a)のnと書いた領域は，不純物が少なく抵抗率が大きい。p形基板は，他の部分より負の電圧を加えるので，基板とn形領域の

間の接合には逆方向電圧が加わり，区分された各n形領域は電気的に互いに絶縁される。

集積回路では，このようにして，基板の上に何個ものトランジスタ・ダイオード・抵抗が，一工程中に形成され，しかもそれらの素子間の結線も完成する。

集積回路は，厚さ0.1～0.3〔mm〕で，大きさ1〔mm^2〕程度の小片の上に数十個の素子を組み込み，結線も完了している。これを用いることによって，電子機器は著しく小形化される。

さらに最近では，60万個以上もの素子を数ミリメートル平方の基板内に組み込んだ**大規模集積回路（LSI）**の製造技術が進み，電子機器はますます小形化されている。

問　　題

1. 図11(b)の回路が120〔kHz〕で発振する場合のLを求めよ。ただし，C_1＝0.01〔μF〕，C_2＝0.005〔μF〕とする。

2. 図22のC_1，C_2の大きさは，どのように影響するか。

3. パルス波や三角波・のこぎり波が用いられる例を挙げよ。

4. フリップフロップ回路が，パルスの計数に用いられるのはなぜか。

5. スイッチ回路と増幅回路の動作上の差異を述べよ。

6. 飽和形スイッチの利点と欠点を述べよ。

7. 不飽和形スイッチでは，クランプ回路が必要な理由を説明せよ。

8. トランジスタスイッチ回路のスイッチ速度を限定する原因を述べよ。

9. 双安定マルチバイブレータと無安定マルチバイブレータとの差異を動作のうえから説明せよ。

10. 集積回路の特徴を述べよ。

第4章
電気通信

通信は，人間が社会生活を営むうえで欠くことのできない手段で，昔から多くの工夫がなされてきた。電流を通信の手段とした電信は，伝える距離と速さの点で，当時の人々にとって革命的なことであった。電気通信は，有線通信である電話や無線通信である放送などとして，長足の進歩をとげた。電気通信の技術は，現在もすばらしい発展をとげつつある。この章では，このような有線通信や無線通信のしくみについて調べる。

ミリ波通信装置

1 音響機器

この節のねらい　人々は話し合って意志を伝え合う。音声による情報の伝達は，人間にとって太古から重要なことであった。電子装置の発達によって，遠隔の土地まで音声を伝達することができるようになったと同時に，録音技術の発達でいつでも音声を聞くことが可能になった。

ここでは，音の性質，音を電気信号に変換する方法，電気信号を音に変換する方法を調べ，明りょうに音を伝達するための拡声装置や，録音の方法などについて学ぶ。

1. 音　　波

(1) 音の伝搬

音波が媒質の中を伝わるのは，媒質の中の分子が音波のエネルギーの影響で振動し，その振動が相接した分子に順次伝わるからである。そのため，音波の伝搬速度 u〔m/s〕は，媒質が軽いほど，また，弾性の強いほど大きい。したがって，媒質の密度を ρ〔kg/m³〕，体積弾性係数を K〔N/m²〕とすると，u は，次の式で与えられる。

$$u=\sqrt{\frac{K}{\rho}} \tag{1}$$

温度が上がると ρ が減少し，空気中での音の伝搬速度は増す。温度が t〔°C〕のときの音の伝搬速度 u は，次の式で表される。

$$u=331.45+0.61t \tag{2}$$

(2) 音の単位

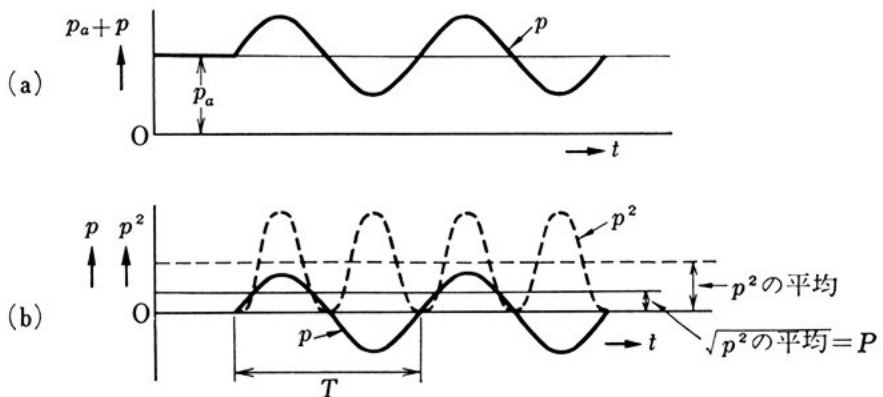
音　圧　図1(a)のように，空気中において，音波のない状態

では，大気圧 p_a であるが，音波が到来すると，音の圧力 p が加わり，空気圧は大気圧 p_a を中心として p の波形で変化する。p は図(b)のように，正負に変化するので，p の実効値 P で音による圧力（**音圧**）を表す。音圧の単位には，圧力の単位パスカル〔Pa〕を用いる。1〔Pa〕＝1〔N/m²〕＝10〔μbar〕の関係がある。大気圧 p_a の大きさは約 10^5〔Pa〕（＝1.013〔bar〕）で，ふつうの音圧は，100〔Pa〕の程度である。

音の強さのレベル　音波の進行する向きに垂直な単位面積を，単位時間に通過する音のエネルギーを**音の強さ**といい，I〔W/m²〕で表す。いま，媒質の密度を ρ〔kg/m³〕，音波の伝搬速度を u〔m/s〕とすると，音圧 P〔Pa〕と音の強さ I〔W/m²〕の間には，次の関係がある。

$$I=\frac{P^2}{\rho u} \qquad (3)$$

音の強さ I は，1000〔Hz〕で，人の聞き取ることのできる最小の値 $I_0=10^{-12}$〔W/m²〕の強さを基準として表す。ふつう次の式のような**音の強さのレベル**（sound intensity level: **SIL**）で表す。

図1　音　圧

$$\mathrm{SIL}=10\log_{10}\frac{I}{I_0}\ \text{〔dB〕} \qquad (4)$$

音圧レベル　音の強さ 10^{-12}〔W/m²〕は，大気中で $P_0=2\times10^{-5}$〔Pa〕の音圧に相当する。これを基準にして，音圧 P〔Pa〕を，次の式のような**音圧レベル**（sound pressure level: **SPL**）で表す。

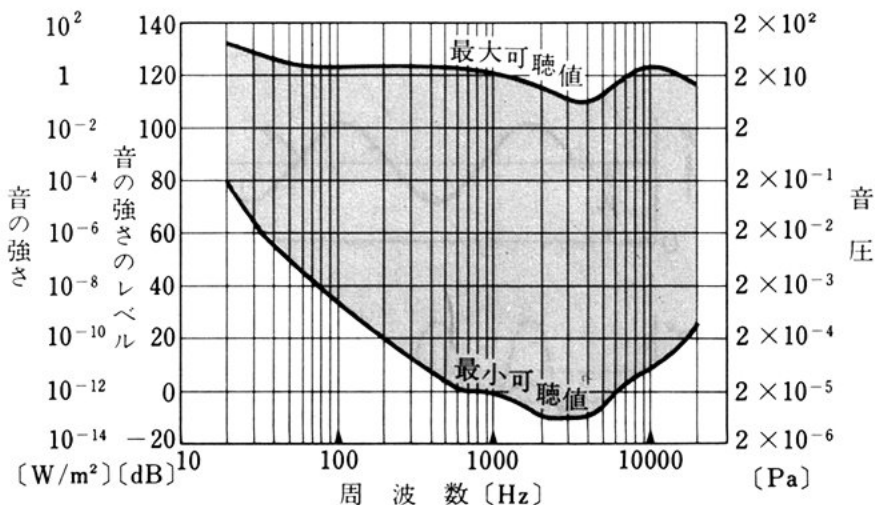
$$\mathrm{SPL}=20\log_{10}\frac{P}{P_0}=20\log_{10}\frac{P}{2\times10^{-5}}\ \text{〔dB〕} \qquad (5)$$

問 1.　音圧と音の強さの違いを述べよ。

（3） 聴覚と音声

人間の耳は，あまり弱い音を聞き取ることはできない。その限界の音の強さを**最小可聴値**という。また，あまり強い音を聞くと，痛く感じ，正常の音として感じない。その音の強さの限界値を**最大可聴値**という。

最小可聴値や最大可聴値は，周波数によって異なるとともに，個人差・年齢差によっても異なるが，標準的な人について平均すると，図2の曲線のようになる。

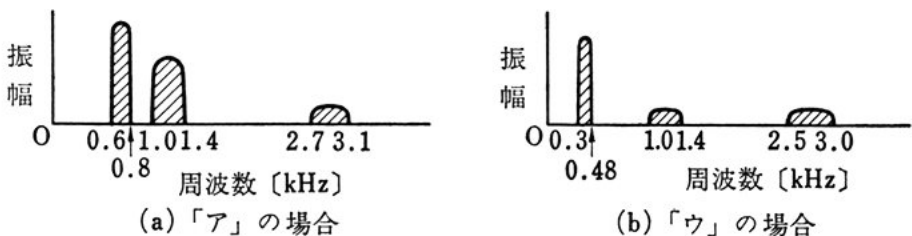
図 2　人間の平均的聴覚の範囲

図から人間の耳が聞き取れる範囲は，音の強さで 10^{-12}～1〔W/m²〕，周波数で 20～20000〔Hz〕である。

音の強さや音圧を dB を用いて示すのは，音の領域がこのように広い範囲であって，人間に感覚される音の大きさは，刺激量の変化率に比例する。すなわち，音の強さの対数にほぼ比例するから，人間の耳が聞き取れる最小の音の強さ I_0 を基準にした対数で表すと都合が良いためである。

音の大きさ　耳に感ずる音の大きさは，周波数で異なるので，これを定量的に表すために，**音の大きさのレベル**（loudness level）が用いられる。すなわち，ある音の大きさのレベルを，これと同じ大きさの感じを与える 1〔kHz〕の音の強さのレベル（dB）で表し，単位に**ホン**（phon）を用いる。

音　声　会話に使われる人の声は語音ともいわれ，母音（ぼいん）と子音（しいん）とに大別される。語音は多くの周波数成分を含んでおり，また，口や鼻およびのどなどで構成される共鳴器の作用で，特定の周波数が強められ，特徴ある音声が作られる。音声の波形や周波数成分は複雑であるが，例えば，図 3 に「ア」，「ウ」の音を例にとって示したように，その音声を特徴づける共通の周波数帯の分布がある。これを**ホルマント**（formant）という。会話でのホルマントの周波数の範囲は，男声で 100～7000〔Hz〕程度，女声で 200～9000〔Hz〕程度

図 3　ホルマント

(a)「ア」の場合　(b)「ウ」の場合

の範囲である。また，語音の音圧レベルの範囲は，およそ40〔dB〕である。

楽器の音　楽器の音は，基本となる音（**基音**）とその高調波（**倍音**）とで構成される。人間の耳に感ずる音の大小は，主に音波の強弱によって変わり，音の高低（**音程**）は，音波の周波数によって変わる。同じ音程でも音色が違うのは，倍音の含まれ方も重要な原因であるが，そのほかにもいろいろな感覚的な原因が含まれている。

マスキング効果　騒音の激しいところでは，大きい声でないと聞き取れない。このように，他の音の存在で，ある音の最小可聴値が上がる現象を**マスキング効果**という。この現象を利用して，騒音を音楽などで気にならないようにすることもできる。

2. マイクロホンとピックアップ

音や振動のエネルギーを，電気エネルギーに変換する変換器に，マイクロホンとピックアップがある。

(1) マイクロホンの感度

マイクロホンの**感度**（sensitivity）は，マイクロホンに一定の音圧を加えたとき，開放したままの出力端子に現れる出力電圧の大きさで表し，これを**電圧感度**という。音圧をP〔Pa〕，出力電圧をV〔V〕とすると，電圧感度は，次の式で定義される。

$$\text{電圧感度}=\frac{V}{P}\quad〔\mathrm{V/Pa}〕\qquad(6)$$

電圧感度をS〔dB〕で示すと，次のようになる。

$$S=20\log_{10}\frac{V}{10P}\quad〔\mathrm{dB}〕\qquad(7)$$

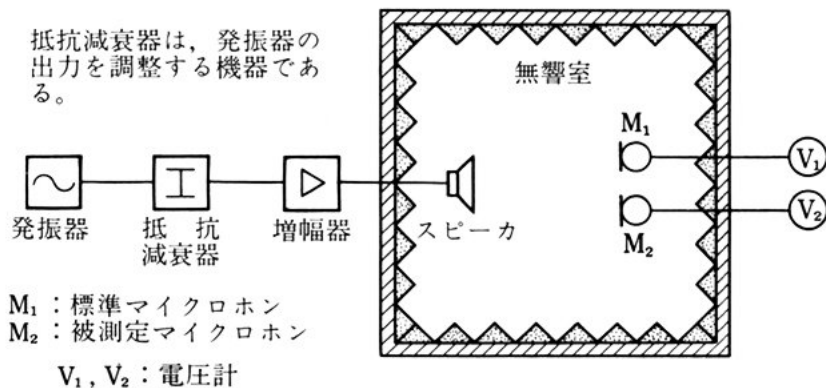
0.1〔Pa〕（=1〔μbar〕）の音圧をマイクロホンに加えたときの出力

電圧の値を，1〔V〕を基準（0〔dB〕）として，dB で表示する。

（2） マイクロホンの周波数特性の測定

マイクロホンの感度が，周波数に対して変化するようすを表すものを**マイクロホンの周波数特性**という。一般に，横軸に周波数を対数目盛で，縦軸に電圧感度・電力感度を dB で表す。また，縦軸には，1000〔Hz〕や使用周波数の中心周波数に対する相対値を dB で表した**レスポンス**（response）をとることが多い。

図 4 に示すように，無響室の中に音源としてスピーカを置き，その前面に電圧測定用の標準マイクロホン M_1 と被測定用のマイクロホン M_2 を置いて，音源の周波数を変え，M_1 の出力電圧 V_1 が一定になるように音圧を調整し，M_2 の出力電圧 V_2 を読み取り，式（6）または式（7）を用いて，マイクロホンの周波数特性を求める。このような測定法を**音場校正**（field calibration）という。このほかに，音源とマイクロホンを直接，短い円筒で結合して測定する**音圧校正**（pressure calibration）も行われる。

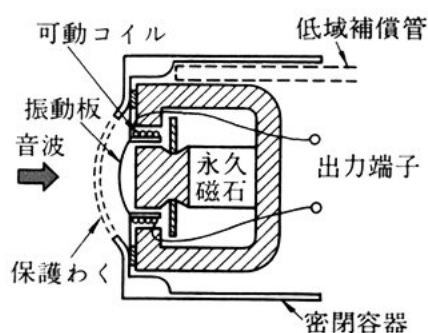
図 4　マイクロホンの周波数特性の測定例

(3) マイクロホンの種類

マイクロホンを原理から分けると，カーボン形・動電形・静電形・圧電形などになる。

カーボンマイクロホン　これは，電話機用の送話器として，広く用いられており (p. 121 図8)，直流電流を流すので，感度は良いが，雑音が多く，動作が不安定なので，電話機以外ではほとんど使用されていない。

ダイナミックマイクロホン　これは，放送局などの録音スタジオで使用されるものから，一般用のものまで多くの種類がある。その構造は，図5(a)に示すように，永久磁石によって磁気回路を作り，その磁界中に，振動板のついたコイルを入れたものである。音圧が振動板に加わるとコイルが振動し，磁束を切るから，そのコイルに，音圧に比例した電圧が発生する。このことから動電形ともよばれる。図(b)に，その周波数特性の一例を示す。

リボンマイクロホン　これは，主に放送局などの録音スタジオで使用され，その構造は，図6(a)に示すように，細長い磁極の間に，アルミニウムはくで作った可動リボンをつり下げたものである。リ

図5　ダイナミックマイクロホン

(a) 構　造　　(b) 周波数特性

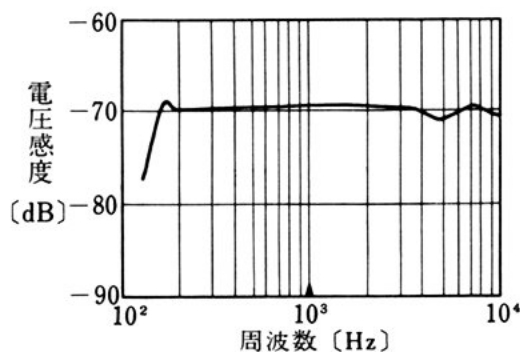
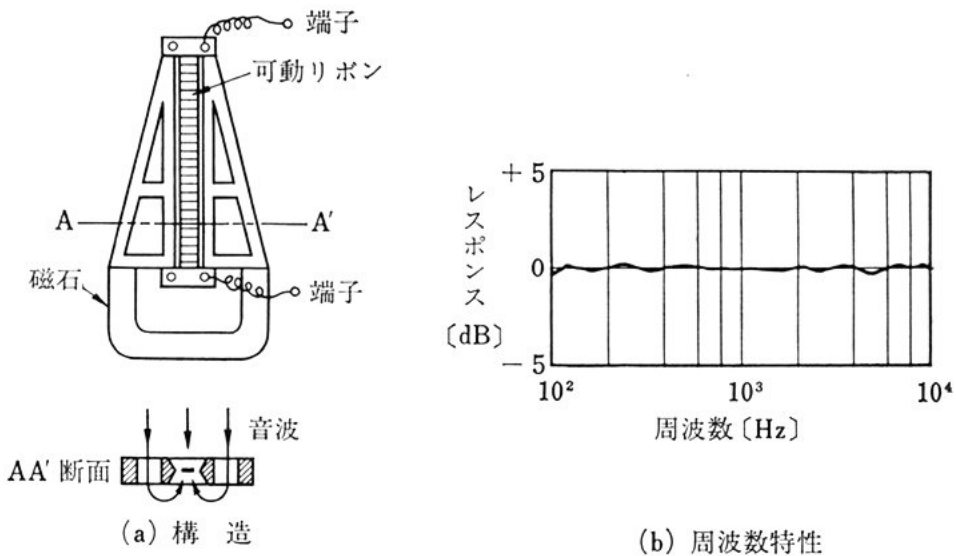
(a) 構 造

(b) 周波数特性

図 6 リボンマイクロホン

ボンは両面の圧力差で動き，磁極間の磁束を切るので，リボンの両端に電圧が生ずる。このことから静圧形ともよばれる。

リボンの横の向きに伝わる音波ではリボンが動かず，音波の速度の向きに感度があるので，**ベロシティマイクロホン**ともよばれる。図(b)に，その周波数特性の一例を示す。

コンデンサマイクロホン　これは，標準マイクロホンとして使用され，図7(a), (b)に示すように，薄い導電性の振動膜と，背面に固定電極をもった構造であり，振動膜と固定電極の間の静電容量が，音圧で変化することを利用する。振動膜と固定電極間に大きい抵抗を通して直流電圧を加えると，振動膜の振動によって，静電容量の変化を生じ，充放電電流によって，抵抗の端子に出力電圧が現れる。このことから，静電形とよばれる。図(c)に，その周波数特性の一例を示す。

クリスタルマイクロホン　結晶の圧電現象を利用するもので，

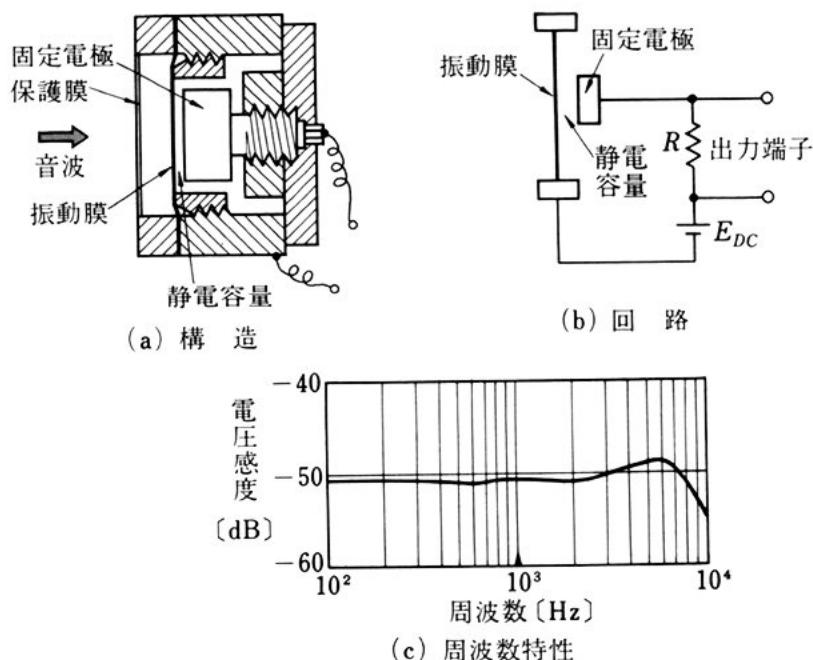



図 7　コンデンサマイクロホン

ロシェル塩のような圧電素子に振動板を取り付け，振動板に音圧を加えると，圧電素子がひずみ，圧電出力が発生するから，その出力端子から信号電圧を取り出すことができる。構造がきわめて簡単であり，手軽に使用することができるが，経年変化があるため，現在はあまり使用されない。

表1に，各種のマイクロホンの感度を示す。

表 1　マイクロホンの感度

種　　類	電圧感度〔dB〕
ダイナミックマイクロホン	−65〜−72 (600〔Ω〕) −52〜−62 (10〔kΩ〕)
リボンマイクロホン	−72〜−80 (600〔Ω〕)
コンデンサマイクロホン	−45〜−55 (増幅器付き) −52〜−75 (増幅器なし)
クリスタルマイクロホン	−50〜−65

(「各種カタログ」による)

問 2. 音圧 0.2〔Pa〕のとき，出力電圧が 0.01〔V〕であるマイクロホンの電圧感度はいくらか。そのときのデシベル値はいくらか。

問 3. 電圧感度 −65〔dB〕のマイクロホンに基準音圧を加えたときの出力電圧はいくらか。ただし，電圧感度 10〔V/Pa〕を 0〔dB〕とする。

問 4. コンデンサマイクロホンに直流電圧がなぜ必要か。

問 5. コンデンサマイクロホンとダイナミックマイクロホンを比較し，その違いを述べよ。

(4) ピックアップ

機械的振動を電気信号に変換する変換器として，**ピックアップ** (pickup) があり，レコードの録音再生に用いられる。レコードは，現在プラスチック製円板に，図 8(a) に示すような，みぞ（**マイクログルーブ**）が切り込まれて作られる。レコード円板の回転に伴って，みぞに沿って針が左右に振動することで，録音が再生されるようになっている。レコードは，録音時の雑音やひずみを小さくする目的で，あらかじめ図(b)のように，録音特性の補正が行われており，再生時にこれと逆の補正を行って周波数特性が平らになるようにしている。

ピックアップは，レコードのみぞに沿った針先の運動を検出して，電気信号に変える変換機構（**カートリッジ**）と，これをレコードの面

図 8　マイクログルーブと録音特性

(a)

(b)

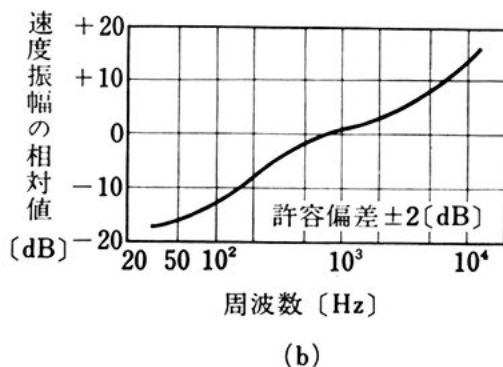
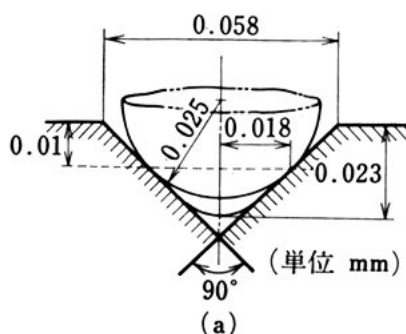
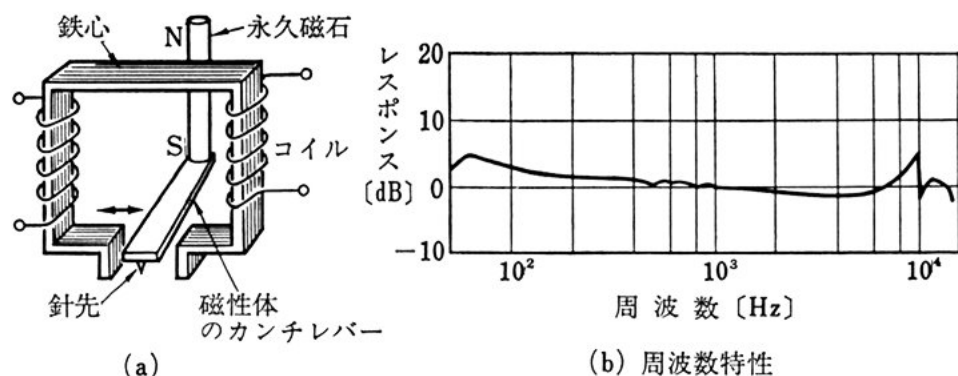



図 9　電磁形ピックアップ

上に適正に保持する部分（**アーム**）とからなっている。

カートリッジ　変換機構によって分類すると，可動コイル形・圧電形・電磁形となる。

可動コイル形は，出力電圧は針先の速度に比例し，鉄心などをもたないので，ひずみも少なく，一般に高級品とされている。**圧電形**は，**クリスタルピックアップ**ともよばれ，感度が高く，軽量で安価であるので，広く使われている。**電磁形**は，可動コイル形に比べると，鉄心をもつためにその欠点が現れるが，振幅が小さいので，性能もかなり良く，構造が簡単でじょうぶであり，出力が大きいことなどの特色がある。

図9(a)は，電磁形ピックアップの原理を示したものである。針先が振動すると，針に結合された磁性体のカンチレバーが左右に振動し，鉄心とのすき間が変化して磁気抵抗が変わるので，コイルを通る磁束が変化し，振動に比例した電圧がコイルに発生する。図(b)は，電磁形ピックアップの周波数特性の一例である。

3. スピーカ

電気信号を音のエネルギーに変換する変換器にスピーカがある。

(1) スピーカの感度

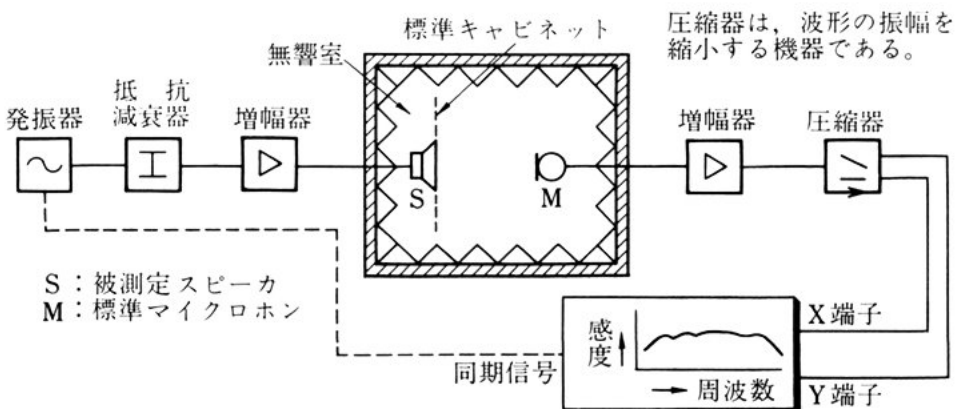
スピーカの感度には，次の電圧感度・電流感度・電力感度がある。ただし，Pは音圧〔Pa〕，Vは入力電圧〔V〕，Iは入力電流〔A〕，Zはスピーカのインピーダンス〔Ω〕である。

$$電圧感度=\frac{P}{V}\ 〔Pa/V〕\quad または，20\log_{10}\frac{10P}{V}\ 〔dB〕 \tag{8}$$

$$電流感度=\frac{P}{I}\ 〔Pa/A〕\quad または，20\log_{10}\frac{10P}{I}\ 〔dB〕 \tag{9}$$

$$電力感度=\frac{P\sqrt{Z}}{V}\ 〔Pa\cdot\Omega^{\frac{1}{2}}/V〕\quad または，20\log_{10}\frac{10P\sqrt{Z}}{V}\ 〔dB〕 \tag{10}$$

$$電力感度=\frac{P}{I\sqrt{Z}}\ 〔Pa/(A\cdot\Omega^{\frac{1}{2}})〕\quad または，20\log_{10}\frac{10P}{I\sqrt{Z}}\ 〔dB〕 \tag{11}$$

図 10 スピーカの周波数特性の測定

dB 表示は，$Z=1$〔Ω〕で 1〔V〕または 1〔A〕を加えたとき，0.1〔Pa〕の音圧を生ずる感度を，基準（0〔dB〕）としたものである。

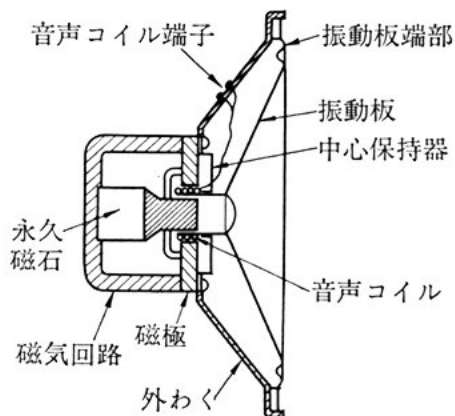
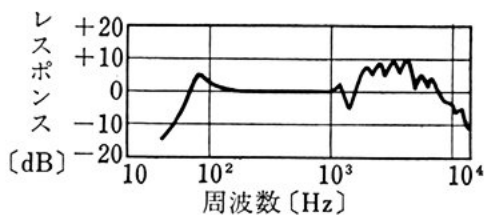
（2） スピーカの周波数特性の測定

図10に示すように，無響室の中に被測定スピーカと音圧測定用の標準マイクロホンを配置し，発振器の周波数を変化させて，周波数に対する感度を測定する。また，一定の距離だけ離れた点の音圧が，スピーカの向きによってどのように変わるかを測ると，スピーカの指向特性が求められる。

（3） スピーカの種類

スピーカは，音を放射する方法によって，直接放射形スピーカとホーンスピーカの2種類に分けられる。

直接放射形スピーカ　振動板を振動させて，それから直接空気中に音を放射させるスピーカである。振動板だけが空中で振動しても，振動板の表裏にできる空気の疎密が，音波の回り込みによって打ち消されてしまうから，有効に音が放射されない。したがって，振動板の周囲に，表裏をへだてる広い隔壁（バフル，baffle）を設け

図 11　ダイナミックスピーカ

(a) 構　造

(b) 周波数特性

たり，裏側を箱（キャビネット，cabinet）で閉じたりする。振動板はできるだけ軽く，しかも剛性を保つために，紙を円すい状などにして用いる。振動板を**コーン**（cone）といい，直接放射形スピーカを**コーンスピーカ**ともいう。コーンスピーカの代表的なものが**ダイナミックスピーカ**で，図11に，その構造と周波数特性の一例を示す。

ホーンスピーカ　振動板が小さいと，音波の放射の能率が良くない。ホーンを通して徐々に断面を大きくして，空気中に放射するようにしたものを**ホーンスピーカ**といい，ホーンの形によって放射特性が異なり，いくつかの種類がある。

4. 拡　声　装　置

（1） 音響出力の条件

多くの人に音声や音楽を明りょうに聞かせるために，マイクロホンやスピーカを使った拡声装置が用いられる。電気音響装置は，音の大きさ，周波数特性，指向特性などを調整して音質を改善して，明りょうに，高忠実に伝えるように工夫される。

図 12　音響出力の条件

(a)

(b)

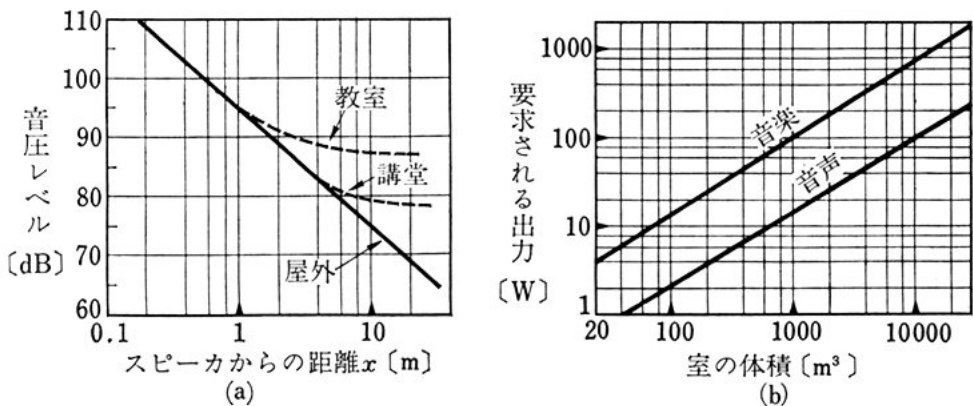



図12(a)はスピーカから放射された音の強さが，スピーカからの距離が増すとともに弱くなることを示す例で，教室や講堂では，人の有無，壁や天井からの反射の影響で屋外とは異なる。

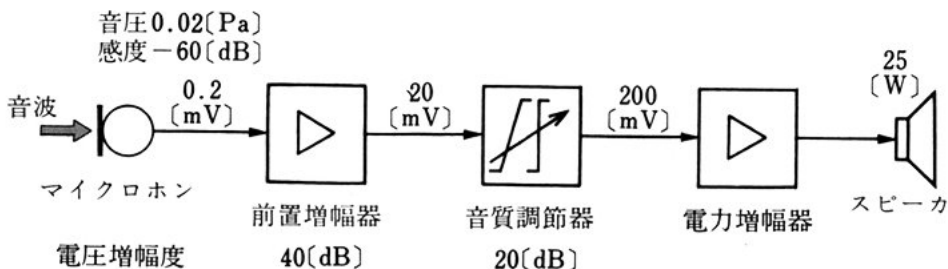
拡声装置からの音響圧力は，スピーカの個数，配置，室の広さ，聴衆の人数などで必要な大きさが異なる。平均音圧レベルは，音楽に対しては85〔dB〕，音声に対しては75〔dB〕を与えることを目標にし，それぞれの最大値は平均値よりもさらに15〔dB〕大きいことが必要であるとして，これを増幅器に要求される出力の目安とする。図12(b)は，ふつうのスピーカを用いた場合の，室の体積に対して必要な増幅器の出力の目安を与える図である。

（2） 増　幅　器

マイクロホンなどからの音を増幅して，スピーカから音として放射することを考えると，図13のような構成となる。

マイクロホンやピックアップの出力電圧は微小なので，これらを増幅する必要があり，そのための増幅器を**前置増幅器**（pre-amplifier）といい，入力インピーダンスが大きく，低雑音で，利得は約40〔dB〕程度である。目的に応じて，周波数特性を低音・高音でそれぞれ補償する回路を**音質調節器**という。

また，レコード盤などは，特定の周波数特性で録音されているので，再生するさいに，増幅回路で補正する必要がある。このような

図13 増幅器の構成

回路を**等化器**という。前置増幅器には，ふつうこのような音質調節器や等化器が含まれている。

スピーカを働かせるための電力増幅器を**主増幅器**といい，終段は一般にB級プッシュプル増幅回路で，スピーカ負荷に電力を供給することができる。

(3) 増幅器の条件

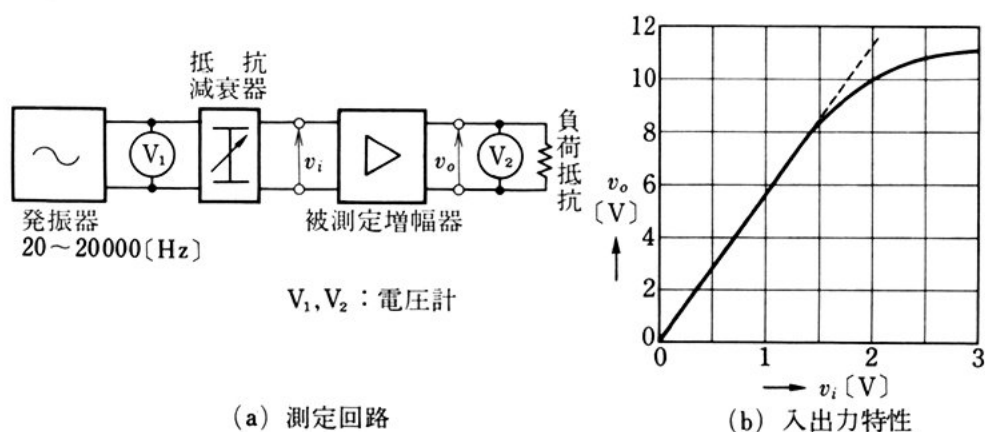
増幅器は，周波数特性・ひずみ率などが良好であることが必要である。

周波数特性　耳の可聴範囲は20～20000〔Hz〕程度であるから，音響装置の再生音もこのような帯域幅をもつとともに，この範囲内で，平らな周波数特性であることが要求される。周波数特性は，図14(a)に示すように，被測定増幅器の入力電圧 v_i を一定に保ち，基準周波数（1〔kHz〕）のときの出力を基準（0〔dB〕）として，周波数に対するレスポンスを測定して求める。

ひずみ　増幅器の入力電圧 v_i を徐々に増していくと，図14(b)のように，出力電圧は，初めは入力電圧に比例して直線的に増加するが，この直線関係がくずれてくるようになると，出力波形は入力波

図 14　増幅器の特性の測定

(a) 測定回路

(b) 入出力特性

形と異なるようになり，ひずみが生ずる。これを**非直線ひずみ**（**振幅ひずみ**）という。増幅器の直線性がわるいと，入力電圧が正弦波でも出力波形は非正弦波となり，基本波のほかに，高調波を含むようになる。このようなひずみを**高調波ひずみ**という。

増幅器に加わる入力は，音声や楽器の波形のように複雑な波形である。もし高い周波数 f_1 と低い周波数 f_2 の二つの信号が，非直線性のある増幅器に加わると，高調波のほかに，二つの信号の和や差の周波数成分 $mf_1 \pm nf_2$（m, n は整数）を生ずる。このようなひずみを**混変調ひずみ**という。

ひずみの程度を示す**ひずみ率** k の値は，増幅器の最大出力のとき 0.01 すなわち 1〔%〕以内に抑えるのがよい。

5. テープレコーダ

（1） 磁気録音の原理

磁気録音は，プラスチックテープに微細な磁性体粉末を塗布した磁気テープに，信号に応じた磁化を行って記録するものである。磁気録音は，図 15 (a) に示すように，きわめてせまいギャップのあるリング状の鉄心にコイルを巻いた磁気ヘッドを，磁気テープに接触させて，録音や再生を行う。録音用の磁気ヘッドを**録音ヘッド**，再生用の磁気ヘッドを**再生ヘッド**といい，一つの磁気ヘッドで録音と再生の両方を行うこともある。

録　音　図 15 (a) のように，録音ヘッドのコイルに信号電流を流し，磁気テープを録音ヘッドのギャップに接触させながら，一定速度で移動させると，信号電流に比例した磁界がギャップに発生し，磁気テープの磁性体は，この磁界で磁化される。したがって，信号

（a）信号電流による磁化　（b）録音の過程

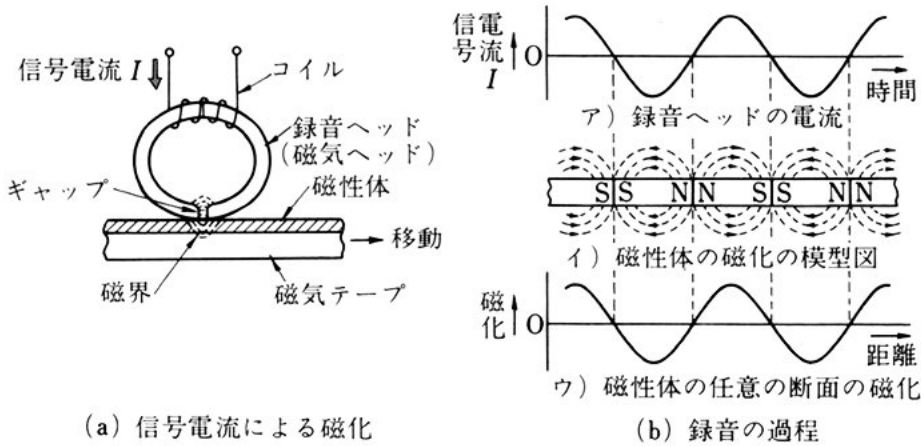



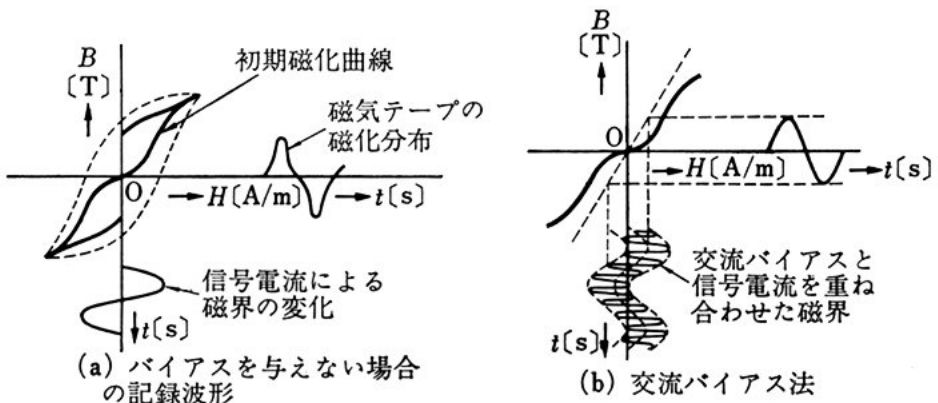
図 15　磁気録音の原理

電流の時間的変化は，図(b)のように，磁気テープの磁性体の残留磁気の場所的変化として記録される。磁気テープ上に記録される信号の波長と，磁気テープの速度および信号電流の周波数との間に，次の関係がある。

$$テープ上の波長 = \frac{磁気テープの速度}{信号電流の周波数} \qquad (12)$$

交流バイアス法　磁気テープの磁性体の磁化曲線の例を，図 16 (a)に示す。図のように，磁化は磁界の強さに比例せず，とくに磁界の弱い範囲では，残留磁気が残らない範囲（直線範囲）がある。

図 16　磁気テープの磁性体の磁化曲線

（a）バイアスを与えない場合の記録波形　（b）交流バイアス法

したがって，信号電流だけで磁化したのでは，図(a)のように，磁化分布の形は信号とは違い，ひずみを生ずる。

そこで，録音ヘッドに信号電流とともに一定の高周波電流を流し，交流磁界をバイアスとして加えて録音し，ひずみを軽減する**交流バイアス法**がある。この方法では，図(b)のように，ギャップを離れるときの信号の磁界に相当する磁化が残ることなるので，残留磁気の残らない直線範囲の影響が除かれ，また信号電流で磁化できる範囲も広くとることができるので，広く用いられている。交流バイアスや消去に用いる高周波は，録音すべき信号の5倍以上の高い周波数が用いられる。

再　生　記録された磁気テープを再生ヘッドに接触させて，録音のときと同じ速度で移動させると，磁気テープ上の残留磁気によって，再生ヘッドの鉄心に磁束の変化が生ずる。テープの移動する向きの磁化の変化は，鉄心を通る磁束の時間的変化となり，コイルに，再生信号として，磁束の変化率に比例した誘導電圧が現れる。

消　去　磁気テープに記録された磁化の変化をなくしてしまうことを**消去**といい，消去に用いる磁気ヘッドを**消去ヘッド**という。

図17(a)のように，消去ヘッドに，式(12)で定まる波長がギャップの幅よりもはるかに短いような高周波の大きな電流を流して，磁

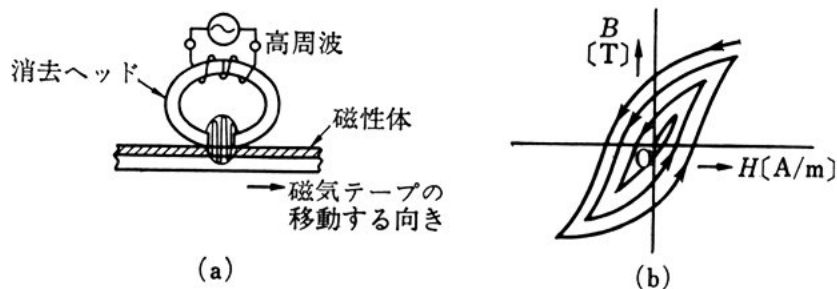



図17 交流消去法

気テープを磁化すると，磁気テープが移動して，ギャップから離れるに従って，図(b)のようなループをえがきながら，磁化が徐々に弱くなり，磁化のない状態になる。この方法を**交流消去法**という。

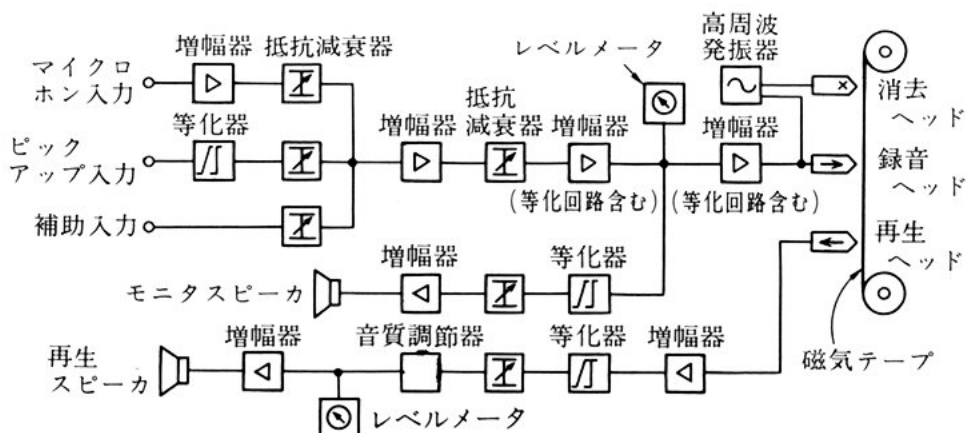
問 6. 消去のさいに，交流バイアスの周波数が高くないと，どんなことが起こるか。

問 7. 磁気テープの速度が19〔cm/s〕のとき，信号電流の周波数が1000〔Hz〕であった。テープ上の波長はいくらか。また，周波数が高くなるとどうなるか。

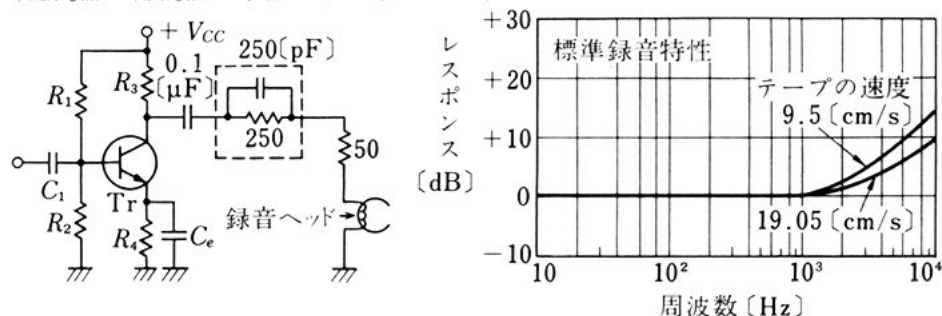
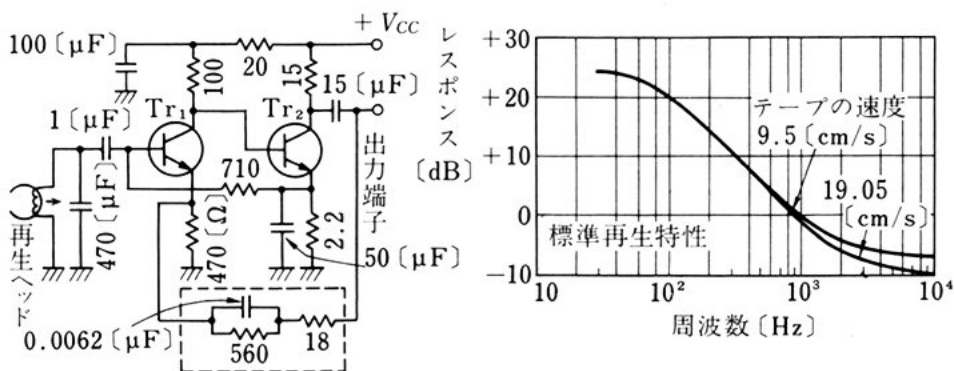
問 8. 磁気録音ができる周波数の上限は，ギャップの幅やテープの速度で決まる理由を考えよ。

（2） テープレコーダの構成

テープレコーダ（磁気録音機）は，図18のように構成されている。録音すべき入力は，じゅうぶん増幅された後，高周波発振器の出力とともに，録音ヘッドに供給される。録音ヘッドの磁界は，コイルの巻数と電流の積に比例するから，録音周波数の範囲にわたって，一定の電流が流れるようにする。この方法を**定電流録音法**という。

図 18　テープレコーダの回路構成の例

定電流録音法で記録された磁気テープを再生すると，再生ヘッドに発生する電圧は，磁束の変化率に比例するから，同じ強さに磁化されていても，周波数に比例して出力電圧は高くなる。再生される出力は，周波数が高くなるとともに，1オクターブ（周波数が2倍となる）ごとに6〔dB〕ずつ増大することになる。実際には，磁気ヘッドのいろいろな損失のため，さらに高い周波数では出力が低下し，再生される周波数特性は，山形の曲線となる。

録音と再生の等化回路　テープレコーダでは，録音・再生の総合的な周波数特性を平らにするため，録音と再生のさい，周波数特性を補償する等化回路が必要である。**SN 比**（信号電圧と雑音電圧の実効値の比）や，ひずみなどを考慮して，録音のとき高い周波数範囲

図 19　高域補償回路と低域補償回路

（a）高域補償回路

（b）低域補償回路

を補償（**高域補償**）し，再生のとき低い周波数範囲を補償（**低域補償**）するように，等化回路の特性が規格として定められている。

図19(a)の破線で囲んだ部分は，高域補償回路である。出力段と録音ヘッドの間に，抵抗とコンデンサの並列回路をそう入して，高い周波数ほど録音電流が多くなるように，またエミッタ回路に適当な静電容量のコンデンサ C_e を接続して，高い周波数での利得が大きくなるようにしている。

図(b)の破線で囲んだ部分は，再生回路に加えられた低域補償回路である。2段目のトランジスタ増幅回路の出力側から入力側に接続された負帰還回路に，コンデンサと抵抗を並列にして用いることにより，低い周波数での利得が，ちょうど1オクターブごとに，6〔dB〕ずつ増加するようにしている。

問　　題

1. 音波の伝わる速さは，媒質の性質とどんな関係があるか。
2. 音の強さ I，音圧 P とは何か。両者の間にはどんな関係があるか。
3. 音の大きさのレベルとは何か。音の強さとどんな関係があるか。
4. マイクロホンの電圧感度とは何か。
5. 感度 −40〔dB〕のマイクロホンに，0.5〔Pa〕の音圧を加えると，出力電圧はいくらになるか。
6. コンデンサマイクロホンに加える直流電圧を変えると，電圧感度はどうなるか。
7. スピーカをマイクロホンの代わりに用いることができるが，マイクロホンとの違いはどこか。
8. スピーカの感度とは何か。また，感度を大きくするには，どうすればよいか。
9. マイクロホンの周波数特性を調べるには，どうすればよいか。
10. スピーカの周波数特性を調べるには，どうすればよいか。
11. 拡声装置には音質調節器が必要である。なぜか。
12. 磁気録音の交流バイアス法とは何か。その働きを説明せよ。
13. テープレコーダの全体の構成を図にかけ。また，その録音と再生の総合特性を平らにするため，どんな工夫がなされているか。

有線通信

この節のねらい　離れた地点の間を電線路で結んで，電流によって情報を伝送する通信を**有線通信**という。情報をあらかじめ約束した符号の形で送る電信や，音声を電気信号に変換して送る電話は，われわれの日常生活でもなじみ深い通信手段である。

ここでは，有線通信の手段・方式・構成などについて調べる。

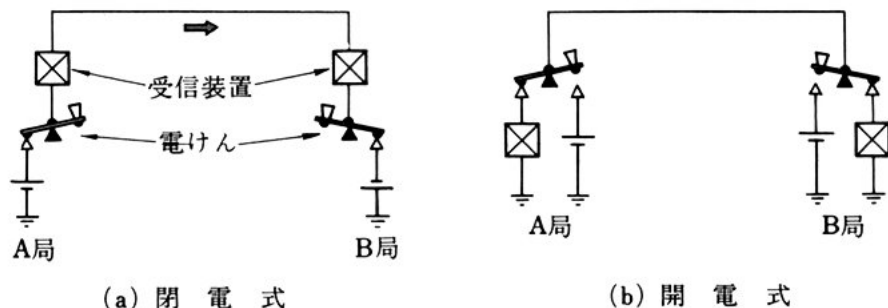
1. 電　　信

(1) 直 流 電 信

図1のように，電池・電けん・受信装置を結線し，電けんを操作すると，線路電流は開閉されて，相手局の受信装置が動作する。受信装置として電磁石を用いれば，その接極子の動作を受信者が耳で聞くことができ，ペンレコーダを用いれば，受信電流の波形を紙に記録して目で見ることができる。この場合，電けんによる線路電流の断続のしかたを，あらかじめ決められた約束に従うことにすれば，離れたところに，文字や数字などの信号を伝達することができる。

このような電気通信の方式を**電信**（telegraph）という。また，電

図1　直流単信形電信回線

(a) 閉　電　式　　(b) 開　電　式

信信号を直流で伝送する電信を**直流電信**といい，1対の線路（図1のように，片線は大地を帰路とすることもある）で，交互に一方向の通信を行うものを**単信法**といい，同時に両方向の通信を行うものを**双信法**という。図1(a)のように，通信の休止時に電流を流しておく方式を**閉電式**といい，図(b)のように，電流を流さない方式を**開電式**という。

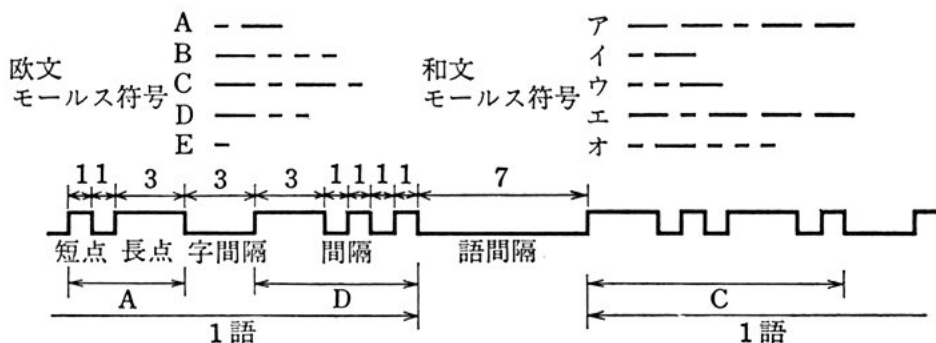
問 1. 図1(a)と図(b)における受信装置の動作の差を説明せよ。

(2) モールス電信

電信では，文字や数字などの情報は，あらかじめ定められた**電信符号**（telegraph code）の形で送られる。図2は，モールスによって考案された**モールス符号**である。**記号**（mark）と**間隔**（space）の二つの状態があり，記号は**短点**（dot）と**長点**（dash）の組み合わせからなっている。長点の時間長は短点の3倍，字と字の間隔は3短点分，語と語の間隔はふつう7短点分である。短点に相当する長さを符号の**単位**（unit），長点記号および短点記号を**素子**という。

モールス符号には，国際的に用いられる欧文モールス符号と，我が国で用いられている和文モールス符号がある。

問 2. 字間隔・語間隔は，どのような目的のためにあるか。

図 2 モールス符号と波形

(3) 印刷電信方式

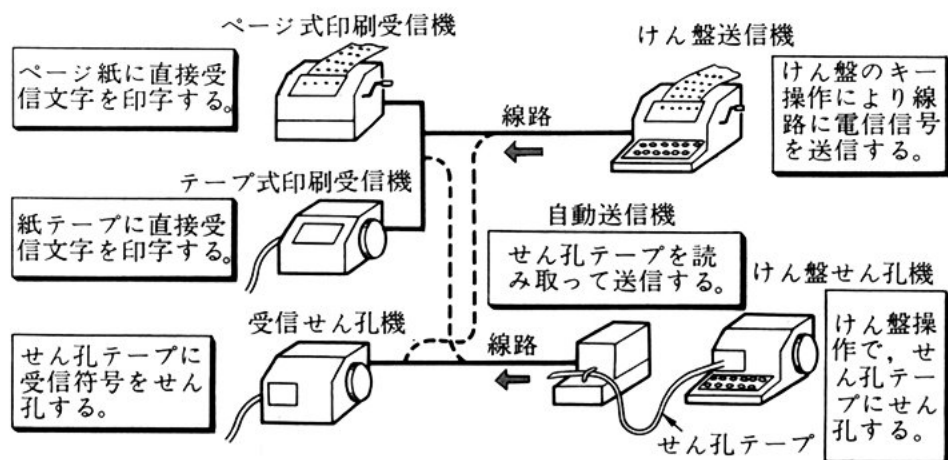
モールス電信では，送受信装置などの設備は簡単であるが，熟練した通信士でも，電けんの操作速度などに制限があるため，大量の電文を速やかに正確に伝達することはむずかしい。

印刷電信（printing telegraph）は，このような要求を達成するために開発されたもので，装置を自動化し，受信された電信信号を文字や数字として判別し，紙に直接印字できるようにした電信方式である。**印刷電信機**（teleprinter）には，図3に示すようなものがある。

けん盤送信機は，タイプライタのように，けん盤のキーをたたくと，直接電信信号を線路に送出するものである。この信号を受信して，タイプライタのように紙面に印字するものを**ページ式印刷受信機**，紙テープ上に印字するものを**テープ式印刷受信機**という。

けん盤せん孔機は，けん盤の操作によって符号をテープにせん孔するもので，**自動送信機**は，このテープを読み取って，符号を自動的に線路に送出するものである。

受信せん孔機は，受信符号を再び紙テープにせん孔して電文の蓄積を行う。

図 3　各種の印刷電信機

このように，印刷電信は，電文の送受信のほか，電文を符号の形で記録し，必要に応じて中継したり，印字したりすることができる。

問 3. 印刷電信機とモールス電信機の違いを述べよ。

（4） 印刷電信符号

印刷電信符号は，一定数の素子の記号と間隔の組み合わせで，文字や数字などを表している。図4(a)は，国際標準の欧文印刷電信符号で，5個の素子で構成されるため，**5単位符号**という。一般に，n個の素子の記号（マーク，図4で●印）と間隔（スペース，図4で○印）の組み合わせで得られる符号の種類は2^nであるから，5単位では32，6単位では64の組み合わせが得られる。

実際の印刷電信では，なるべく少ない単位数で，多くの符号を作るために，上段・下段などの**シフト機構**とよばれる方法を用いている。図4(a)で，下段符号LETTERS（●●●●●）に続く符号は，ABCなどの文字を意味し，上段符号FIGURES（●●○●●）に続

図 4 印刷電信符号

LTRS	FIGS	1	2	3	4	5
A	–	●	●	○	○	○
B	?	●	○	○	●	●
C	:	○	●	●	●	○
D		●	○	○	●	○
E	3	●	○	○	○	○
F		●	○	●	●	○
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
W	2	●	●	○	○	●
X	／	●	○	●	●	●
Y	6	●	○	●	○	●
Z	+	●	○	○	○	●
CARR RET		○	○	○	●	○
LINE FEED		○	●	○	○	○
FIGURES		●	●	○	●	●
LETTERS		●	●	●	●	●
SPACE		○	○	●	○	○
UNP TAPE		○	○	○	○	○

（a） 欧文5単位符号

下段	上段	1	2	3	4	5	6
イ	ヰ	○	○	○	●	○	●
ロ	急	●	○	○	○	●	○
ハ	｜	○	●	○	●	○	○
ニ	〃	○	●	○	●	●	●
ホ	ー	○	●	●	○	○	●
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
ス	／	○	●	○	○	○	●
ン	八	○	○	○	○	●	●
〃	°	○	●	●	●	○	●
上段		○	●	●	○	●	●
下段		○	●	●	●	●	●
間隔		○	○	○	●	○	○
信号		●	○	○	○	○	○
空白		○	○	○	○	○	○
消去		●	●	●	●	●	●
始		●	●	●	●	○	●
終		●	●	●	●	●	○

（b） 和文6単位符号

く符号は，数字や記号を意味する。このように，2段のシフトを用いれば，5単位では，$2\times(2^5-2)=60$〔個〕の符号が得られる。

問 4.　8単位符号からは，何種類の符号が得られるか。

(5) 調 歩 方 式

印刷電信の信号波形は，図5(a)に5単位の場合の例を示すように，休止時にマーク極性を保っておき，符号を送出するときには，スペース極性のスタート符号を1単位分送出し，次に，5個の情報素子を送出した後，マーク極性のストップ符号を送出する。受信装置は，スタート符号の受信で動作を開始し，情報素子の極性を調べて文字を判定し，ストップ符号で休止し，次のスタート符号の受信を待ち受ける。すなわち，モールス電信では，字間隔により，先行する文字と次の文字の判別を行っているが，印刷電信では，文字の前後のスタート符号とストップ符号によって，その判別を行っている。したがって，図5(b)のように，連続的に信号を受信する場合でも，送受信装置間の協同動作（同期）が保たれる。このような方法を**調歩方式**（start-stop system）という。したがって，印刷電信では，n 単位のほかに，2単位の調歩用素子が必要で，5単位符号の場合は7単位となる。

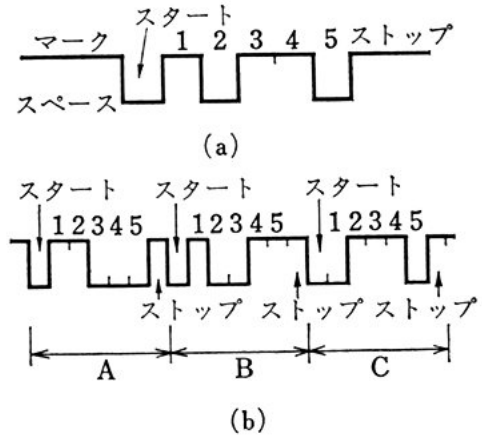



図 5　印刷電信の信号波形

通信速度　1分間に送出できる文字数で示す場合は，字/min で表す。通信速度の他の表し方として，1秒間に送出できる電信符号の素子の数で示す場合があり，1単位（または1素子）の時間の長さを τ〔s〕とするとき，$\dfrac{1}{\tau}$ **ボー**（baud）**の通信速度**という。

問 5.　1単位の時間の長さ 20〔ms〕の印刷電信の通信速度は何ボーか。

（6） 印刷電信機の動作

せん孔テープは，図6(a)に示すように，マークに対応して孔（あな）があけられる。自動送信機のテープ読取り機構は，図(b)に示すように，星車によってテープを繰り出し，マーク孔があれば，テープピンが押し上げられ，連動機構によって舌片（ぜっぺん）がM接点に接触するようになっている。

図7(a)は，読み取った符号を線路に送出する**送信分配機**の原理を示すものである。接点群1～5は，テープ読取り機構の接点に相当し，マークの場合，閉じるようになっている。送信に当たって，コンタ

図 6　せん孔テープとテープ読取り機構

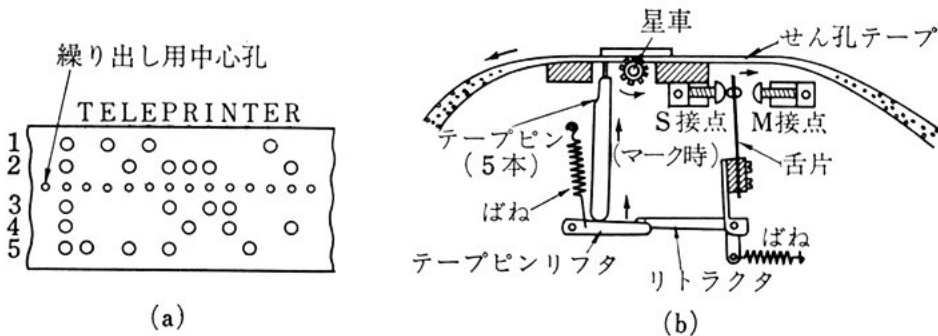
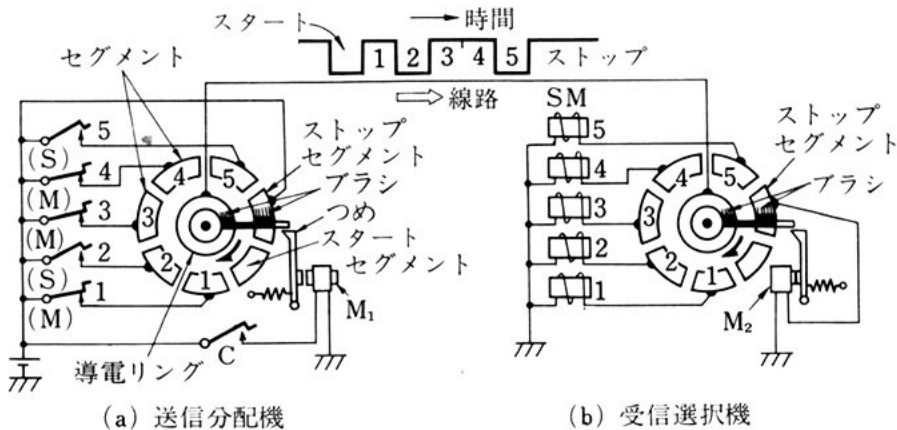



図 7　印刷送受信機の原理

クトCを瞬間的に閉じると，電磁石M_1が動作して，つめを吸引するため，回転軸に結合している分配機のブラシは，ストップセグメントの位置から，時計回りに回転を始め，スタート，1,2,…,5のセグメントを通り，元の位置まで1回転し，図のように，電信符号が線路に送られる。図(b)は，受信側の**受信選択機**の原理を示すもので，スタート符号の受信により，電磁石M_2の電流が断たれ，ブラシは送信側と同じ速度で回転を始め，第1情報素子を受信するとき，ブラシは1の位置にあるようになっている。このため，入力のマークに対応する番号の選択電磁石SMが動作し，それに連動する印字装置によって，受信符号が文字として印字される。

問 6. 印刷電信のスタート・ストップ符号はなぜ必要か。

問 7. 6単位3段シフト符号のとりうる文字数はいくらか。

問 8. 50〔ボー〕，5単位符号は，1分間に何字送信できるか。

2. 電　　話

(1) 電話の原理

電話は，音声の波動を電気信号に変換して伝送し，受信側でこの信号を再び音声に変換して行う電気通信である。図8のように，送話器と電池を用いる送話回路を，誘導コイルを介して，受話器と結線した**電話機** (telephone set) 2台を，電線路で結ぶと両方向の通話ができる。すでに学んだように，音声の周波数範囲は，20～20000〔Hz〕程度であるが，ふつうの会話では，このように広い範囲を必要としないため，電話では300～3400〔Hz〕程度の範囲の伝送を行っている。線路が長くなると，信号が減衰するため，電話機に用いられる送受話器は，なるべく感度が良く，また，ひずみのないよう

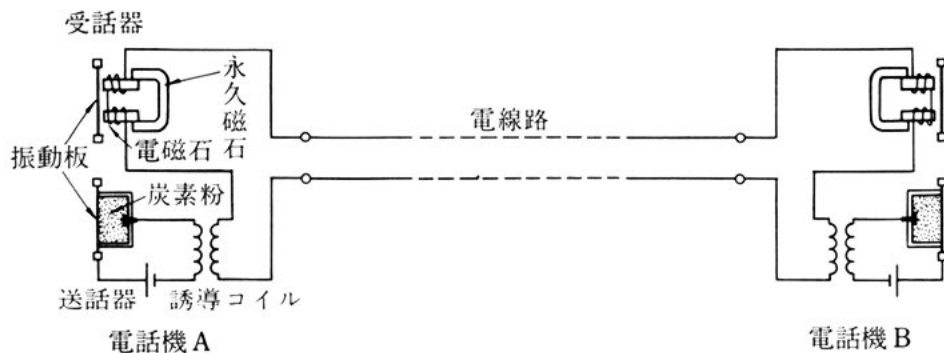



図 8 基本的な電話回路

な特性をもつものが使用される。

送話器としては，音圧によって炭素粉の電気抵抗が変化することを利用して，電池から供給される直流電流を，音声により交流の音声電流に変換する**炭素送話器**が用いられている。受話器としては，電磁石の巻線に音声電流を流して振動板を振動させ，音声の波動に変換する**電磁形受話器**が用いられている。

問 9. 図8の送話回路にある誘導コイルは，何のためにあるか。

（2） 電話機の機能と種類

電話機は，基本的には送受話器をもった1組のセットであるが，次のようないろいろな機能をもっている。

1) 通話がかかってきたことを知らせるベル回路
2) 2地点間の電話などで，相手のベルを鳴らす信号回路
3) 交換機に呼びの発生や終了を伝える電流開閉回路
4) 交換機に相手電話番号を伝えるダイヤル回路

電話機は，本来の通話のための音声信号と，上で学んだ制御用の信号を，同一の1対の線路によって伝送するように工夫されている。

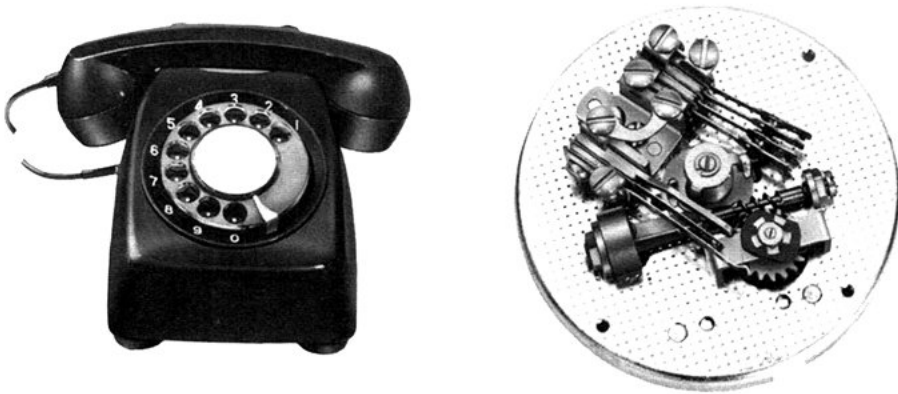
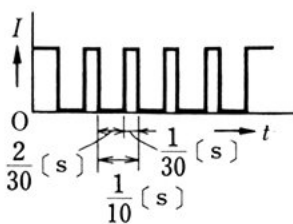
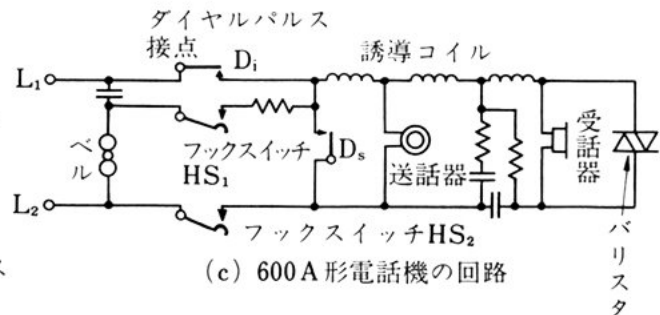
磁石式電話機は，電話機に付属している磁石式発電機のハンドルを回して，相手電話機のベルを鳴らすことができ，2～3台の電話機

を直接つないで用いる。**共電式電話機**は，電話交換台とともに用いられ，電池や呼出し用の発電機を局側に置き，電話機を簡単な構成にしたものである。自動電話機の発展により，現在では磁石式および共電式の電話機はほとんど使われていない。

5　**問 10.**　電話機の送受話器の動作を説明せよ。

（3）　ダイヤル式自動電話機

自動式電話機は，交換機に対して，相手加入者番号を送出する機能をもっている。ダイヤル式自動電話機は，図9に示すような回転ダイヤルを人が操作することによって，図(a)のように，数字に相当する回数だけ，線路に規則正しい断続電流（**ダイヤルパルス**）を送出することができる。ふつう，パルス周期は約 100〔ms〕，断続比は約 $\frac{1}{3}$，数字間，すなわちパルス列と次のパルス列との間の最小

図 9　ダイヤル式自動電話機

(b) 600A形電話機とダイヤルの裏面

(a) 数5のダイヤルパルス　　(c) 600A形電話機の回路

の休止時間（**ミニマムポーズ**という）は，約 600〔ms〕となっているが，高速のものとしては，約 50〔ms〕のものもある。

図 9 (b) は，**600 A 形電話機**とそのダイヤルの裏面を示す。図 (c) は，600 A 形電話機の回路図である。D_1, D_s はダイヤルパルス接点で，ダイヤルを手で回して，それが復帰するとき，D_1 は番号に相当する数だけ回路を断続的に開くようになっている。これによって，交換局から電話機に供給している線路電流を規則的に断続し，交換機側の回路を動作させる。D_s は，この間つねに閉じていて，誘導コイルや送受話機回路を短絡している。

問 11. 図 9 (c) において，ダイヤルパルスの雑音が受話器から聞こえないのはなぜか。

（4）押しボタン式自動電話機

押しボタン式自動電話機は，図 10 に示すような押しボタンを操作することによって，電話番号を送出するもので，回転ダイヤルに比べて，ダイヤル時間が半分くらいに短縮される利点がある。また，

図 10　押しボタン式自動電話機

(a)　600 P 形電話機

	1	2	3	
	4	5	6	
赤ボタン	7	8	9	青ボタン
	✳	0	＃	

(b) 押しボタンの配列

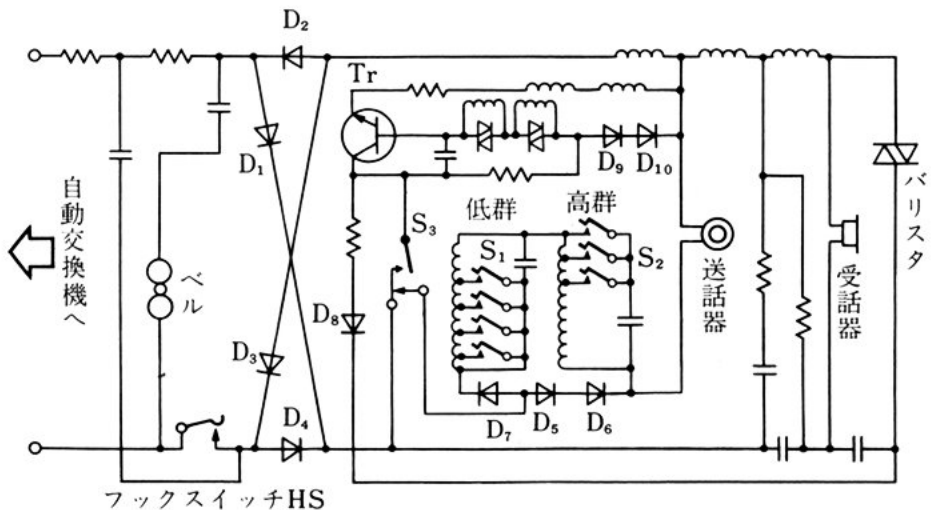
高群 / 低群	1209〔Hz〕	1336〔Hz〕	1477〔Hz〕
697〔Hz〕	1	2	3
770〔Hz〕	4	5	6
852〔Hz〕	7	8	9
941〔Hz〕	✳	0	＃

(c) 周波数の組み合わせ

数字以外の機能ボタン（＊・＃）もあるので，これを用いて，短縮ダイヤルなどの新サービスに使用することができる。

押しボタンにより，図 10(c)に示すように，7種類の周波数のうち，2種類の組み合わせの周波数の電流が送出されるようになっている。例えば，数字1のボタンを押すと，697〔Hz〕と1209〔Hz〕の周波数の電流が送出される。交換機側では，これを受信して，ある周波数範囲を通過させるような特性の電気回路（帯域フィルタ）により，周波数の組み合わせを識別し，数字1の信号が送られてきたものと判定する。

図11は押しボタン式自動電話機の回路を示すもので，ダイヤル式の接点の代わりに，トランジスタ発振回路が付属している。送受話器を上げ，フックスイッチ HS が閉じると，交換機側から供給されている線路電流が，ダイオード D_1～D_4 の全波整流回路によって発振回路の直流電源を作る。発振周波数の切り換えは，押しボタン接点による発振同調コイルのインダクタンスの切り換えによって行われ，必要な二つの周波数を同時に発振させる。

図 11　押しボタン式自動電話機（600 P 形電話機）**の回路例**

問 12.　ダイヤルパルスのミニマムポーズはなぜ必要か。

問 13.　電話機フックスイッチの用途を説明せよ。

3. 交　換　機

(1) 電 話 交 換

図12(a)のように，5台の電話機があって，それらが互いに，どの電話機とも通話できるように線路を設けるとすれば，$\frac{5\times4}{2}=10$ 対(つい)の線路が必要になる。もし，n 個の電話機があれば，$\frac{n(n-1)}{2}$ 対の線路が必要である。しかも，各電話機には，線路を切り換えるためのスイッチを設ける必要がある。

もし，図(b)のように，中央に交換機を置き，そこで必要な電話機と電話機を接続できるようにすれば，1本の線路を多数の電話機のために共用することができ，線路は5対（電話機が n 個のときは n 対）ですむことになる。したがって，電話機が多い場合は，交換機を置くことにより，非常に経済的に構成できることになる。

この場合，交換機での接続は，電話加入者の通話要求（発呼(はっこ)）時に行われ，通話終了（終話）時に切断される必要がある。このよう

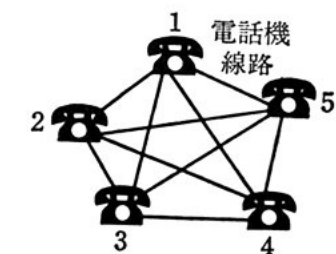
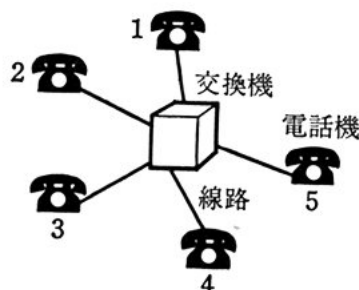



図 12　電話回線と交換機

交換機がない場合，電話機は多数の線路を必要とする。

(a)

各電話機は交換機と結ばれる。

(b)

な接続・切断の操作（交換）を，人が行うことを**手動交換**といい，機械で自動的に行うことを**自動交換**という。

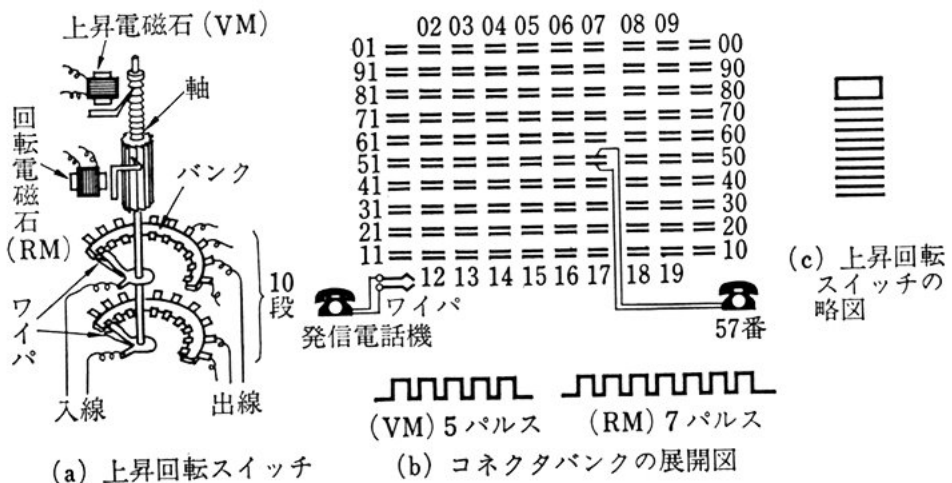
問 14.　電話交換機の必要な理由を考えよ。

（2）　ステップバイステップ式自動交換機

自動交換は，電話加入者のダイヤル操作によって，相手電話番号を交換機に伝え，交換機において自動的に相手を呼び出して，接続を行うものである。**ステップバイステップ式**（step-by-step system）は，従来広く用いられた自動交換機で，その主な機構は，上昇回転スイッチ・ラインスイッチなどの回転スイッチからなっている。

図 13 (a) は，**上昇回転スイッチ**を示すもので，上昇電磁石の巻線に断続電流（ダイヤルパルス）が流れると，その数だけ上昇し，回転電磁石に断続電流が流れると，その数だけ回転する。バンクは 10 段積まれており，各バンクには 10 個の接点が扇状に並んでおり，軸に連結したワイパは，バンクの任意の接点に接続される。図 (b) は，そのバンクの展開図で，ワイパは，100 組（10 接点×10 段）のバンク接点に接続される。上昇回転スイッチを，交換機の**コネクタ**として

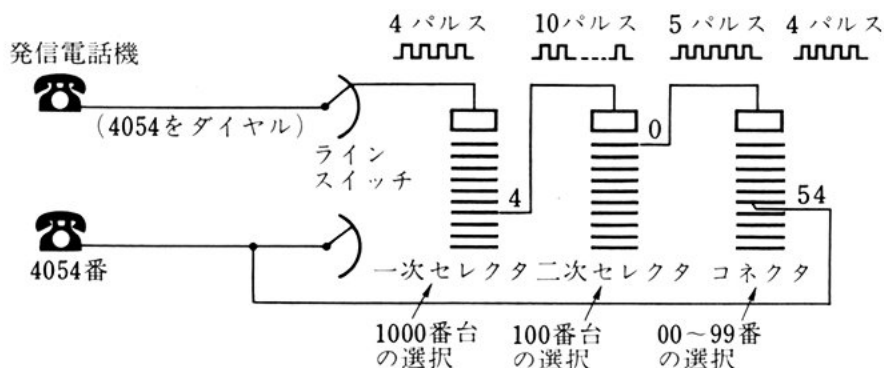
図 13　上昇回転スイッチの構造とコネクタバンク

(a) 上昇回転スイッチ　(b) コネクタバンクの展開図　(c) 上昇回転スイッチの略図

使用するときは，ワイパに発信側の電話機を接続し，各バンク接点00～99に100個の電話機を接続する。例えば，上昇および回転電磁石に，5個および7個のダイヤルパルスを加えると，発信電話機と57番の電話機が接続される。このように，一つの電話機から100個の電話機に接続できることになる。

電話機の数が少ない場合には，コネクタを中心に交換ができるが，10000個というような場合には，図14のように，**セレクタ**とよばれるものを用いる。セレクタには，やはり上昇回転スイッチが用いられる。いま，図のように，4054をダイヤルした場合について考える。一次セレクタは，ダイヤルの第1数字，"4"で4段目に上昇し，自動的に回転して，あき（使用中でない）二次セレクタのつながったバンク接点を選択する。

同様に，二次セレクタは，ダイヤルの"0"で10段目に上昇し，あきコネクタにつなぎ，コネクタは最後の"5"と"4"で5段上昇し，4番目のバンク接点につなぎ，4054番の電話機に接続する。

なお，**ラインスイッチ**は，各電話機に1個ずつ用い，加入者が受話機を上げて，線路電流が流れたとき，自動的にそのワイパが回転して，あきセレクタのつながったバンク接点に接続される。

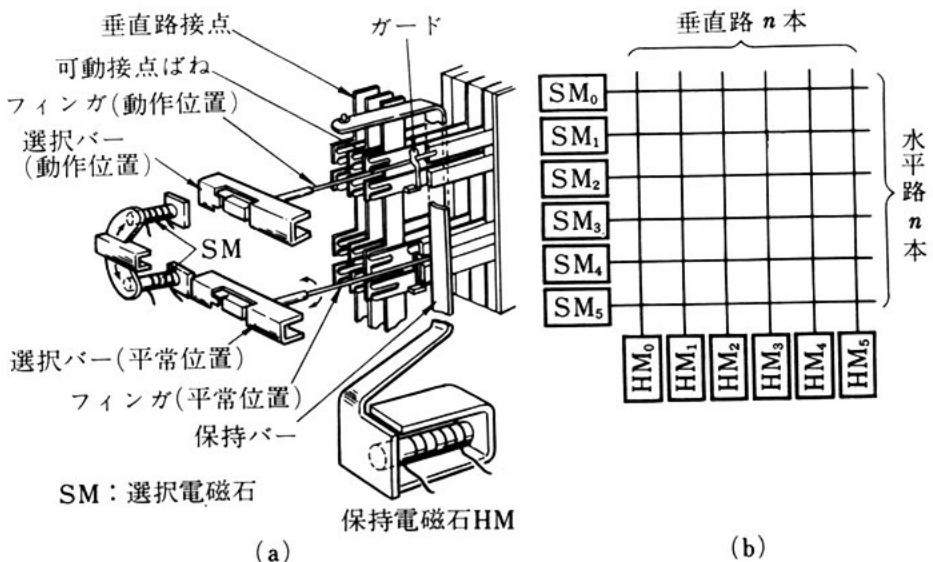
図 14　ステップバイステップ式自動交換機の動作

このように，セレクタを2段設けると，10000個の電話機を収容することができる。この方式は，ダイヤルパルスによって，逐次的にセレクタやコネクタを選択するために，ステップバイステップ式とよばれる。

問 15. ラインスイッチ・セレクタ・コネクタの用途を述べよ。

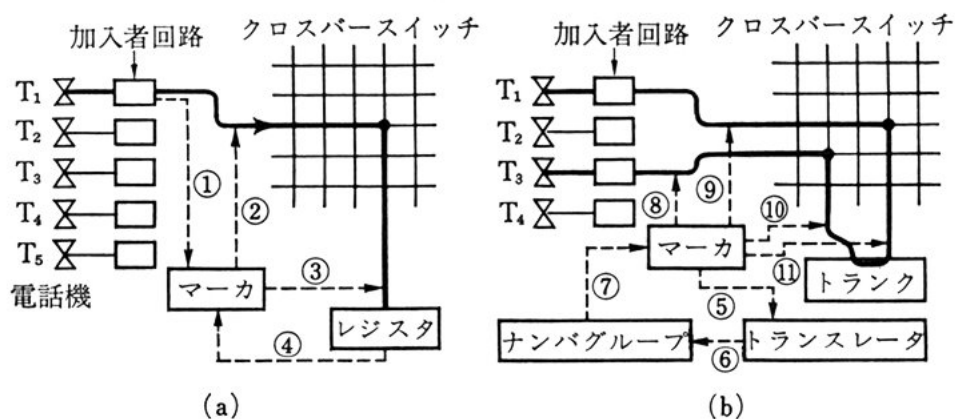
（3） クロスバー式自動交換機

クロスバー式自動交換機は，現在広く使用されている交換機で，これに用いられている**クロスバースイッチ**の説明図と電気回路の概念図を図15に示す。図(b)のように，縦横の垂直路と水平路があって，選択電磁石SMによって水平路が，保持電磁石HMによって垂直路が選択され，格子(こうし)状の中の各交点にある接点が閉じる。したがって，例えば，水平路に入線，垂直路に出線をつないでおけば，選択された交点を通して，入線と出線が接続される。

図(a)は，その動作機構の説明図で，水平路に選択バーがあって，これらは2個の選択電磁石SMによって，上下の向きに回転する

図 15 クロスバースイッチ

ことができる。選択バーに取り付けられたフィンガは，平常はばね組みの中間にあるが，選択バーが上下いずれかに回転すると，それに対応したばね組みに入り込む。次に，保持電磁石 HM が動作すると，保持バーがフィンガを上から押さえるので，この箇所の接点が閉じて，接続が行われる。接続後，選択電磁石は復旧するが，フィンガはとどまるので，保持電磁石が復旧するまで接続は保たれる。

クロスバー式自動交換機の動作　図 16 (a) で，加入者回路が発呼を検出すると，①のようにあきマーカをとらえ，マーカは②，③のようにクロスバースイッチ中のあき線をさがし，加入者線をレジスタにつなぐ。ここで，マーカは復旧するが，レジスタは発信電話機に発信音を送り，次に，ダイヤルパルスを受信し，数字として記憶する。ここでレジスタは，④のように，マーカをとらえ，電話番号をマーカに伝える。図 (b) で，マーカは，その番号をさらにトランスレータに伝え，市内・市外接続などの判断（これを番号翻訳という）をさせる。また，ナンバグループによって，選択・保持電磁石を指定する情報を得て，⑧～⑪のように，トランクを介して通話路を完成させる。

図 16　クロスバー式自動交換機の制御回路の働き

このように，クロスバー式自動交換機は，ステップバイステップ式自動交換機とまったく異なった動作をしている。マーカ・レジスタなどの制御回路は，一つの回路で多数の通話に対して共通に使用されている。このような制御方式を**共通制御式**といい，ある通話の接続動作が終わり，通話に入ると，次の通話の接続に移るため，能率的な制御ができる。

問 16. 図 15(b) において，同時接続の数は最大いくつか。

(4) 電子交換機

電話交換機を経由して，広い地域の加入者が相互に通話できるようになっているが，さらに新しいサービスの追加などに対して，融通性があり，かつより小形で信頼性の高い交換機の導入が，望まれるようになった。

電子交換機は，このような目的によく適合するため，各国で開発が進められ，我が国では，昭和 45 年に D 10 形とよばれる大局用電子交換機が実用化された。

電子交換機では，継電器などの電磁機構部品の代わりに，トランジスタ，IC，LSI などの電子部品が主体となっており，その動作速度は電磁部品に比べてけた違いに速く，このため共通制御による能率的な処理を実現することができる。また，電磁部品のように，材料の疲労，接点の摩耗といった動作回数に依存するような寿命制限の度合いが小さく，信頼性の点でも優れている。

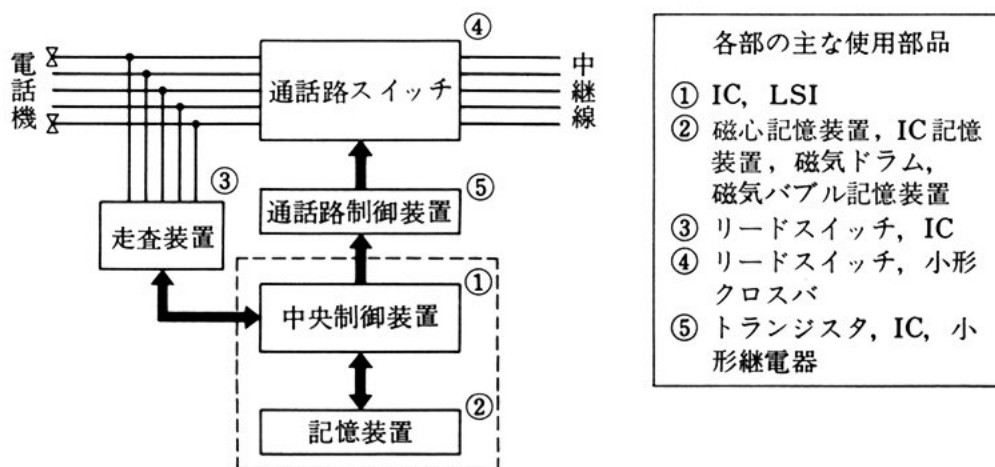
通話路スイッチ　交換機の中で入線と出線をつなぐ部分を通話路スイッチというが，その特性としては，スイッチの動作時には，音声信号の伝送損失をなくすため短絡状態になり，また開放時には，完全な絶縁状態になるようなものが望ましい。しかし，半導体などの電子部品で，このような特性を実現するのは困難なため，電子交

換機といっても，この部分には電磁機構部品の接点の開閉によるものが多く，D 10 形では小形クロスバスイッチが使用されている。

蓄積プログラム制御方式　電子交換機では，上に述べたように，その機能に融通性をもたせることが重要で，このため蓄積プログラム制御方式を採用している。電子交換機の処理装置としては，はん用の電子計算機，または特別設計の電子計算機が用いられており，**ソフトウェア**（交換のための動作手順，処理内容のプログラム）をあらかじめ中央処理部の記憶装置に記憶させておき，その命令プログラムを順次読み出すことによって，通話路スイッチの開閉など，交換動作を実行させるものである。蓄積プログラム制御方式では，**ハードウェア**（装置本体）とソフトウェアを分離して取り扱うことができるため，装置本体の大幅な変更なしに，ソフトウェアの入れ替えによって，交換機の機能・動作を変更できる特徴がある。

動作の概要　図 17 は，蓄積プログラム制御による電子交換機の構成を示す。走査装置は，中央制御装置の制御のもとに，多数の加入者線を周期的に走査して，加入者の発呼やダイヤル信号を調べ，制御装置に伝える。中央制御装置は，番号翻訳，通話路スイッチへ

図 17　電子交換機の構成

各部の主な使用部品
① IC，LSI
② 磁心記憶装置，IC 記憶装置，磁気ドラム，磁気バブル記憶装置
③ リードスイッチ，IC
④ リードスイッチ，小形クロスバ
⑤ トランジスタ，IC，小形継電器

の接続命令など，記憶装置に蓄えられたプログラムに従って制御を行い，入線と出線を接続する。記憶装置は，大容量のもので，プログラムのほか，電話番号など交換処理に必要なデータを記憶し，制御部によって，記憶内容を書き換えたり，読み出したりすることができる。

4.　通信線路と電話交換網

(1)　通　信　線　路

通信線路には，主に平衡ケーブルと同軸ケーブルが用いられている。

図 18　各種のケーブル

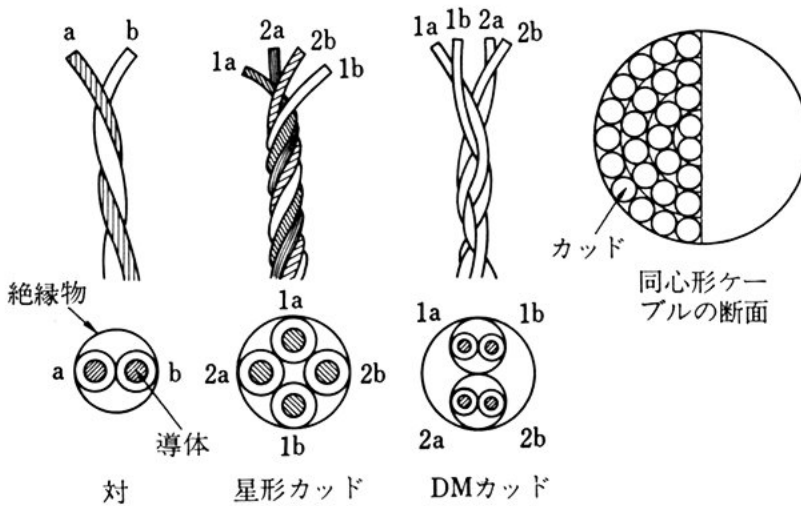
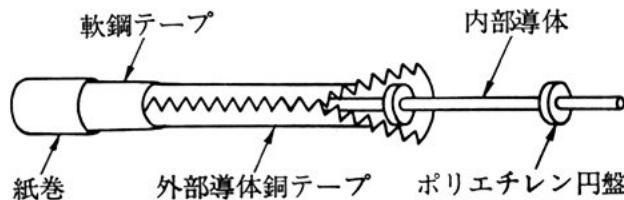



図 19　同軸ケーブルの構造

平衡ケーブルの導体には，直径 0.32～0.9〔mm〕の軟銅線を用い，図18に示すような対(つい)・星形・DMとよばれる線を十～数百対束ねて同心形ケーブルを作り，さらにこれをより合わせて，数千対にものぼるユニット形ケーブルを構成している。

同軸ケーブルの構造は，図19に示すように，パイプ状の外部導体の中心に内部導体を配置するもので，内部導体に信号電流を流し，外部導体を帰路とするものである。標準的な同軸ケーブルとしては，外部導体の内径 9.5〔mm〕，内部導体の外径 2.64〔mm〕のものなどがある。同軸ケーブルは，高周波における減衰が少ないため，広帯域伝送に適しており，100〔MHz〕程度の伝送帯域をもつものが開発されている。

（2） 搬 送 電 話

広帯域の伝送が行える通信回線を用いて，多くの電話信号を伝送する多重化伝送として**搬送電話方式**がある。電話信号は，300～3400〔Hz〕の比較的狭帯域であるから，各回線の信号を周波数変換して多重化し，広帯伝送路に送出する。受信側では，この多重化信号を再び分離して，元の電話信号に変換する。

電話信号を多重化するには，一挙に多チャネルの信号の周波数変換を行うのではなく，いくつかの変換の段階を通る場合が多い。図20は，搬送電話の多重化装置の構成別を示すものである。通話路（電話回線）の信号12チャネル分は，周波数変換されて基礎群Gとして多重化される。以下同様に，基礎群5群により60チャネルを収容する基礎超群SGに多重化され，5SGにより300チャネルを収容する基礎主群MGに多重化され，さらに3MGにより900チャネルを収容する基礎超主群SMGのように多重化される。

多重化のための周波数変換方法として，基礎群への変換例を図21

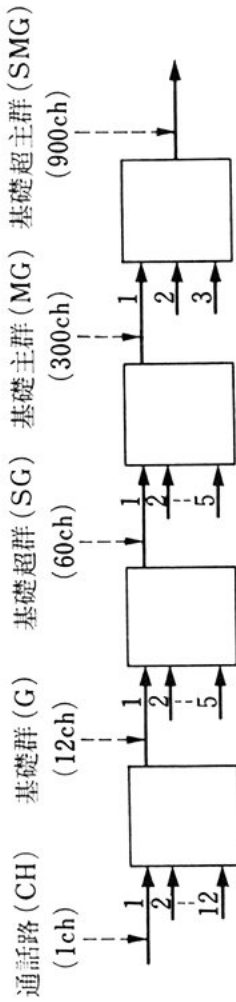



図 20　搬送電話の多重化の段階

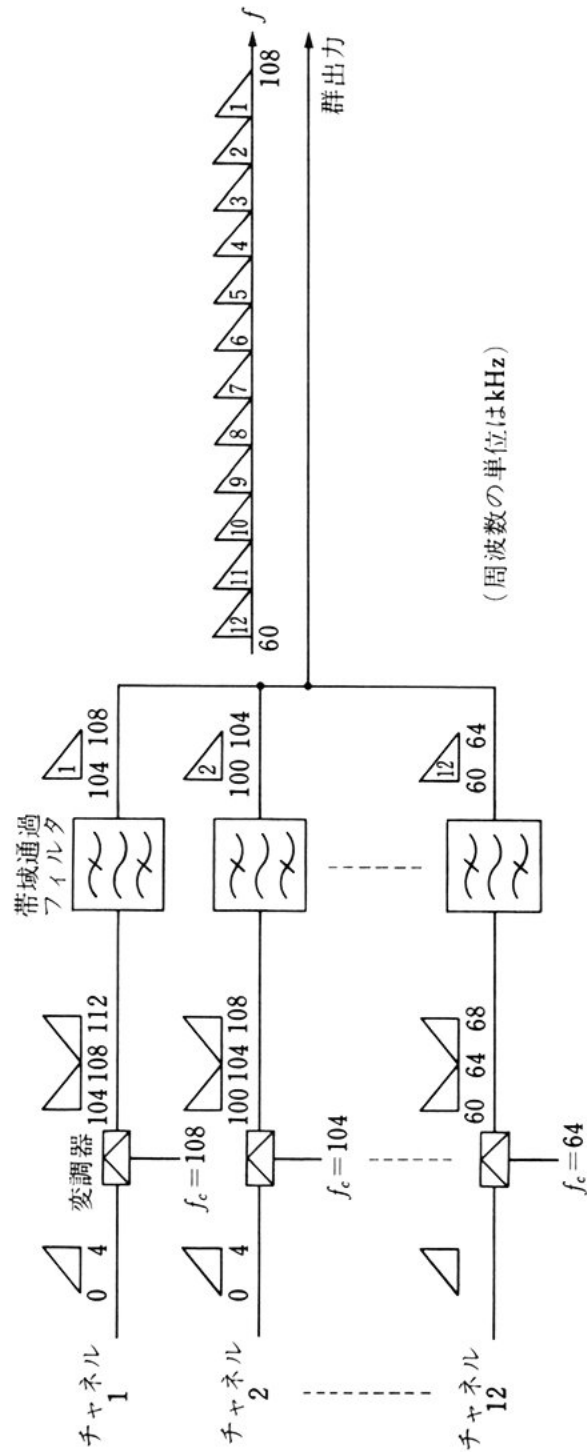



図 21　基礎群への周波数変換多重化

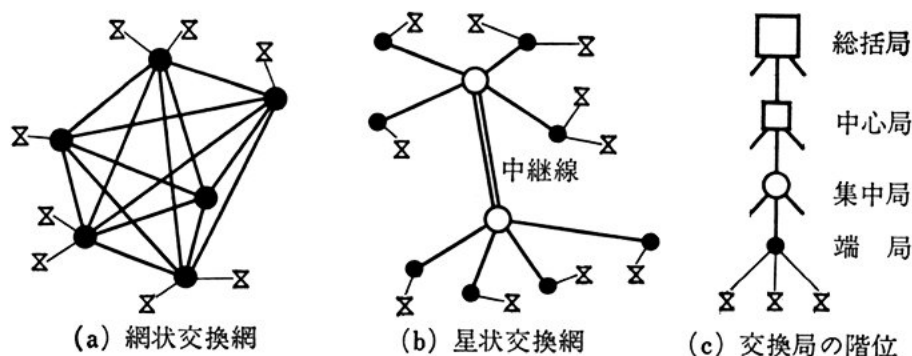
に示す。各通話路に図示した傾斜の高い側は，元の音声の高い周波数を表している。通話路1,2,…,12の音声信号は，それぞれ，108，104，…，64〔kHz〕の正弦波（搬送波）を変調し，その各出力を帯域通過フィルタで下側の側帯波を選択した後合成する。これにより，60～108〔kHz〕の周波数帯域に12の周波数反転した側帯波が集められ，1基礎群となる。基礎群以上も同様な操作で，順次多重化される。

（3） 交換網の構成

交換網には，図22(a)，(b)に示すように，網（あみ）状と星状の2種類がある。**網状交換網**は，直通線で局間を結ぶため，途中の中継はいらないが，線路の数は増加する。**星状交換網**では，図(c)に示すように，交換局に**局階位**とよばれる階級を設けて，上位局は下位局からの通話を集めて，中継交換を行うのがふつうである。したがって，この場合は，通話は多段の交換局を経由することがある。このように，両交換網には，利点・欠点があるが，実際には，これらを組み合わせて構成されている。

同一の交換局内に収容されている加入者間の交換を**自局内交換**といい，二つ以上の交換局間にわたる交換を**中継交換**という。

図22　交換網の構成

(a) 網状交換網　(b) 星状交換網　(c) 交換局の階位

問 17. 同軸ケーブルは広帯域伝送に適するのはなぜか。

問 18. 搬送電話における基礎群の周波数帯域はいくらか。

問 19. 網状交換網と星状交換網には，どんな特徴があるか。

問　　題

5 **1.** 印刷電信において，送信分配機と受信選択機の回転速度が，非常に違っているとどうなるか。

2. 押しボタン式自動電話機の押しボタンを操作中に，送話器から送話したらどのようになるか。

3. クロスバースイッチと上昇回転スイッチの大きな違いは何か。

10 **4.** 蓄積プログラム制御交換機にはどんな特徴があるか。

5. 搬送電話における周波数変換多重化について，例を挙げて説明せよ。

6. モールス電信符号の構成について述べよ。

7. 印刷電信における，電信符号・調歩方式・通信速度について説明せよ。

8. 電話機について，次の問いに答えよ。

15 (1) ダイヤルパルスの時間間隔はどのくらいか。

(2) 押しボタン式電話機にはどんな特徴があるか。

(3) 送受話器の構造と特性について述べよ。

無線通信

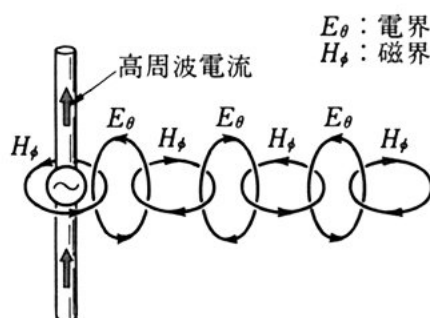
この節のねらい　無線通信は，空間を伝わる電波を利用する通信で，初めは周波数の比較的低い長波が用いられていた。その後，発振器の製作技術の進歩に伴い，電波の利用は，中波・短波・マイクロ波へ，さらにミリ波・光へと及んでいる。また，伝送する内容も，電信・電話の通信から，データ通信・画像通信へと広がっている。これらの電波の利用に関して，我が国では電波法があり，国際的には ITU（国際電気通信連合）無線通信規則がある。

ここでは，無線通信に使われる機器のしくみを理解し，無線通信の用途について調べる。

1. 電波とアンテナ

(1) 電　　波

電流のまわりには磁界ができることはすでに学んだ。ところで時間的に変化する電界が存在するところでは，一種の電流が流れることが知られている。このような電流を**変位電流**という。角周波数 ω の高周波電界の強さを E_θ〔V/m〕とすれば，変位電流は電界の向

図1 電波の発生

電波は，時間的に変化する電界と磁界によって生ずる。

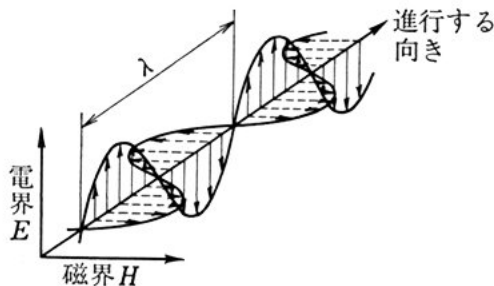
きに流れ，変位電流の強さは $\omega\varepsilon_0 E_\theta$〔A/m²〕（$\varepsilon_0$：真空の誘電率）となり，電界に比べて周期は同じで，位相は90°ずれている。電荷の移動によって流れる電流と同様に，変位電流も磁界 H_ϕ〔A/m〕を作る。この磁界は，光の速さ c で周囲に広がり，$E_\theta=\mu_0 H_\phi c$〔V/m〕（μ_0：真空の透磁率）の起電力を誘導する。この起電力により，再び変位電流が空間を流れるので，磁界が発生する。

この現象を繰り返すことにより，空間には電界 E_θ と磁界 H_ϕ とが，光の速さの波動として周囲に伝わり，それらの強さは距離に反比例して弱くなる。これを**電磁波**といい，特別な媒体を介せずに，遠距離まで伝わる。なお，電波法に決められた範囲の周波数（3×10^3〔GHz〕以下）の電磁波を**電波**という。

電波の強さ　真空中を伝わる光の速さは $\dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}=3\times10^8$〔m/s〕である。電波の電界と磁界は互いに直交し，その強さの比 Z_w は一定である。Z_w〔Ω〕は，電波に対する空間の**波動インピーダンス**といい，次の関係にある。

$$Z_w=\frac{E_\theta}{H_\phi}=\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}=120\pi=377\ 〔\Omega〕 \qquad (1)$$

電界強度は，実用上，高周波電界の実効値で表し，単位はV/mである。また，1〔μV/m〕を基準（0〔dB〕）としてその強さをdBで表すこともある。さらに，進行する向きに直角な単位面積内を単

図2 電波の伝搬

電波は，電界と磁界が互いに直角になるように，交互に生じながら図のように伝わる。

位時間に通過する電波のエネルギーは，E_θ と H_ϕ の積に等しく，これを**ポインチング電力**という。

問 1. 10〔μV/m〕，10〔mV/m〕，10〔V/m〕を dB で表せ。

問 2. 水の比誘電率を 81，比透磁率を 1 として，水中での電波の伝搬速度を求めよ。

電波の波長と周波数　電波の電界や磁界の波動のようすは，図2のように示される。波動の伝搬において，同じ位相にある距離 λ〔m〕を波長といい，光の速さを c〔m/s〕，周波数を f〔Hz〕とするとき，次の関係がなりたつ。

$$\lambda=\frac{c}{f} \tag{2}$$

表1に，周波数と波長による電波の分類を示す。

表1 電 波 の 分 類

周波数による呼称		波長による呼称	
略号および呼称	周波数範囲	呼　称	周波数範囲
VLF (very low freq.)	3～30〔kHz〕	長　波	10～100〔kHz〕
LF (low freq.)	30～300〔kHz〕	中　波	100～1500〔kHz〕
MF (medium freq.)	300～3000〔kHz〕	中短波	1500～3000〔kHz〕
HF (high freq.)	3～30〔MHz〕	短　波	3～30〔MHz〕
VHF (very high freq.)	30～300〔MHz〕	超短波	30～300〔MHz〕
UHF (ultra high freq.)	300～3000〔MHz〕	極超短波	300〔MHz〕以上
SHF (super high freq.)	3～30〔GHz〕	マイクロ波	1000〔MHz〕以上
EHF (extremely high freq.)	30～300〔GHz〕	ミリ波	30～300〔GHz〕

注 1. freq. は，frequency の略。
2. 周波数による呼称は電波法施行規則によったものであり，波長による呼称は慣習によったものである。

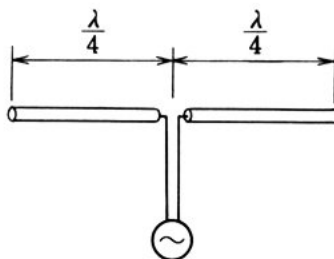
電波の反射と電離層　電波は，誘電率が異なる媒質に入ると屈折し，導体に当たると反射する。地球の上空 100～300〔km〕くらい

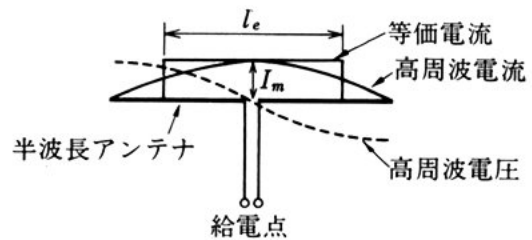
の大気は，太陽からの紫外線で電離しており，ここで電波は屈折し，長波や短波は反射して大地にもどってくる。ここを**電離層**という。また，地上近くで空気の密度の違うところがあると，誘電率の違いのため，周波数が超短波以上の電波は，ここで屈折したり，反射したりすることがある。

（2） ア　ン　テ　ナ

電波を有効に空間に放射したり，空間の電波を有効に受信するためにアンテナが用いられる。

半波長アンテナ　図3(a)のように，導体の長さが電波の波長 λ〔m〕の $\frac{1}{2}$ で，その中央から高周波電力の供給されているものを**半波長アンテナ**という。図(b)のように，導体上の電流は，中央が最大 I_m〔A〕で，先端が0であるように分布して流れる。したがって，アンテナの電流は一様でないから，アンテナの中心部ほど放射に有効に働く。アンテナの放射特性は，電流の大きさとアンテナの長さとに比例する。アンテナの中心部の電流 I_m と同じ大きさの電流が一様に分布した長さ l_e〔m〕のアンテナを考え，もしこのアンテナが元のアンテナと同じ放射をするとき，この長さ l_e を元のアンテナの**実効長**という。半波長アンテナの実効長は $\frac{\lambda}{\pi}$〔m〕である。

図 3　半波長アンテナ

(a) 半波長アンテナ

全長が半波長の導体。中央部が給電点である。

(b)

半波長アンテナに流れる高周波電流は，アンテナの両端で0で，波形は正弦波である。

放射抵抗　アンテナから放射される全電力 P〔W〕が，

$$P=\frac{1}{2}R_r I_m^2 \qquad (3)$$

で与えられるとき，R_r〔Ω〕をアンテナの**放射抵抗**という。半波長アンテナの放射抵抗は，約 73〔Ω〕である。

問 3. 周波数 6〔MHz〕の半波長アンテナの長さと，その実効長を求めよ。

放射特性と利得　アンテナから放射される電界 E_θ，磁界 H_ϕ は，方向によって強さが異なり，アンテナの導体の方向では弱く，導体と直角の方向では強い。これをアンテナの**指向性**という。アンテナの指向性は，受信のときも同じ特性を示す。

また，指向性をもったアンテナに，入力電力 P〔W〕を加えたときの最大放射方向の電界強度に対し，半波長アンテナによって同じ強度の電界を生じさせるための電力を P_0〔W〕とすれば，指向性アンテナの利得 G〔dB〕は，次の式で表される。

$$G=10\log_{10}\frac{P_0}{P} \qquad (4)$$

各種のアンテナ　図 4 (a) は，半波長アンテナの指向性をそろえて配置し，指向性が鋭くなるように工夫されたアンテナで，**ビームアンテナ**といい，短波通信に使用される。図 (b) は，半波長アンテナを鉄塔の周囲に配置して，四方にほぼ同じ指向性をもつように工夫された放送用送信アンテナで，**スーパゲインアンテナ**という。図 (c) は，半波長アンテナの後ろに反射器となる導体を，前に電波を強める働きをする導波器を配置して，指向性を鋭くしたアンテナで，**八木アンテナ**といい，超短波またはそれより高い周波数でよく用いられる。

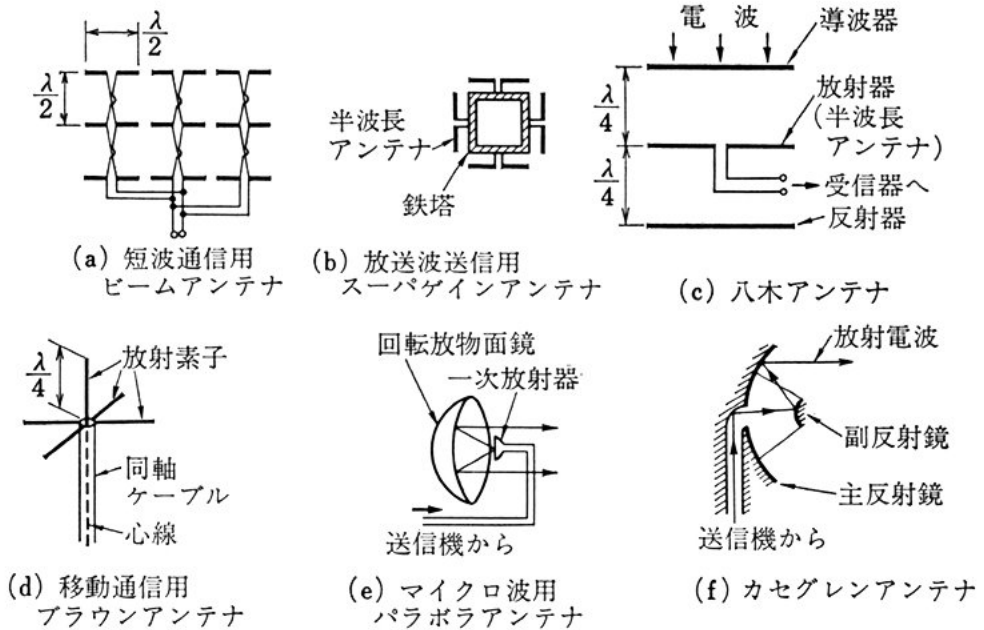
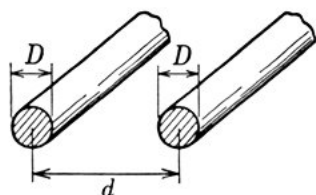
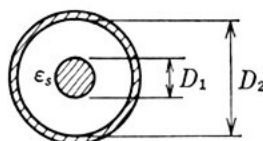



図 4　各種のアンテナ

図(d)は，同軸ケーブルの先端$\frac{1}{4}$波長の部分の外部導体を放射状に広げ，内部導体を露出させて，ほぼ半波長アンテナのようにしたアンテナで，**ブラウンアンテナ**といい，移動通信に使用される。マイクロ波以上の周波数では，反射鏡を利用して指向性を鋭くする方法が使用される。図(e)は，反射鏡として放物面鏡を用いたアンテナで，**パラボラアンテナ**という。また，図(f)は，反射鏡が大きいので，副反射鏡も併用したアンテナで，**カセグレンアンテナ**といい，衛星通信などに使用される。

給電線　アンテナと送受信装置とをつなぐ線路を**給電線**(feeder)という。給電線は，図5のように，その形状と大きさで決まる特定の抵抗があり，この抵抗値に等しい抵抗で終端すると，伝送された波はすべて抵抗によって吸収され，伝送線には反射しない。この抵抗値をその給電線の**特性インピーダンス**という。したがって，特性インピーダンスは，給電線が無限に長いとき，給電線で伝送される波

D：導線の直径〔mm〕
d：導線間の中心距離〔mm〕
$Z_0=276\log_{10}\dfrac{2d}{D}$〔Ω〕

(a) 平行二線式給電線

D_1：内部導体の外径〔mm〕
D_2：外部導体の内径〔mm〕
ε_s：絶縁体の比誘電率
$Z_0=\dfrac{138}{\sqrt{\varepsilon_s}}\log_{10}\dfrac{D_2}{D_1}$〔Ω〕

(b) 同軸ケーブル

図5 給 電 線

の電圧と電流の比とも考えられる。給電線の特性インピーダンスZ_0をアンテナの放射抵抗に合わせる（**整合**（matching）させる）ために，変成器が使われる。図5に，平行二線式給電線と同軸ケーブルを示す。

2. 無 線 送 信 機

無線送信機は，高周波電力を発生する装置で，送信電波形式・周波数・用途などによって，いろいろな種類のものがある。

（1） 送信電波の形式

無線通信では，送信電波を信号波で変調し，アンテナから放射する。変調の形式と変調信号波の種類（伝達の形）を表す記号およびそれらの意味を，表2に示す。例えば，ふつうのラジオ放送はA3，テレビジョンの映像電波はA5，また，テレビジョンの音声電波はF3で表される。

（2） 無線送信機の構成

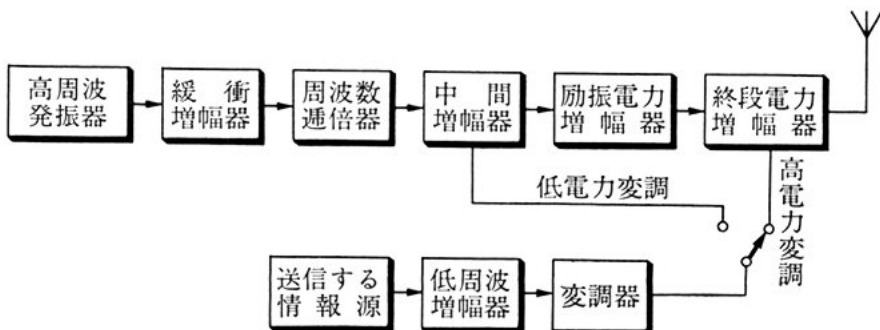
無線送信機の構成は，用途や発射電波の形式，周波数および高周

表 2 変調の形式と変調信号波の種類

形式または特性	記号	記 号 の 意 味
変 調 の 形 式	A	振幅変調
	F	周波数（または位相）変調
	P	パルス変調
伝 送 の 形 式	0	変調のないもの
	1	変調用可聴周波数を用いない電信
	2	1または2以上の変調用可聴周波数の電けん操作または変調波の電けん操作による電信（特別の場合は電けん操作をしない変調波）
	3	電 話
	4	写真および模写伝送
	5	テレビジョン
	9	複合した伝送および前の各号に当てはまらない場合

波電力などによって，各種の方式が実用されている。図6に，無線送信機の基本的な構成を示す。

高周波発振器　搬送波用の高周波を発生させるのが，高周波発振器で，周波数を安定に保つためには水晶発振器が使われ，周波数を可変にするためには LC 発振器が使われる。高周波発振器は，発振周波数が安定であることが必要である。そのため次段には，緩衝増幅器および中間増幅器が接続され，高周波電力の増幅と，負荷の変動

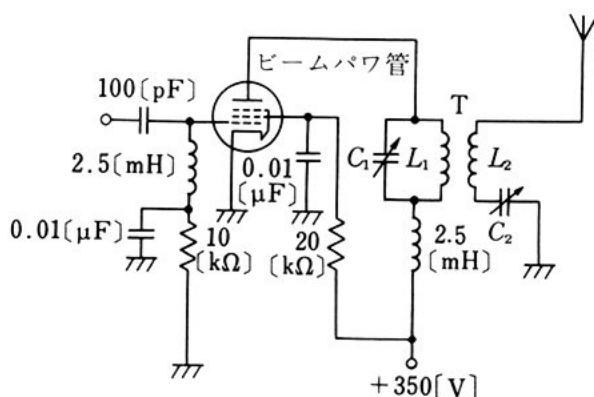
図 6　無線送信機の基本的な構成

によって，発振周波数の変動するのを抑圧する働きをしている。

また，送信周波数が高い場合には，発振周波数を送信周波数の整数分の1に選んでおいて，周波数逓倍（ていばい）器によって，送信周波数信号を得る。

変調器　無線通信では，搬送波の振幅・周波数・位相などを変調して送るので，無線送信機には必ず変調器が備えられている。無線送信機には，終段電力増幅器を変調器とする**高電力変調方式**と，中間増幅器の低電力増幅段で変調する**低電力変調方式**とがある。低電力変調方式は，変調するための電力が少なくてすむが，後段の電力増幅器ではひずみの起こるのを避けるため，B級増幅を用いる必要がある。したがって，終段の電源効率は低い。

終段電力増幅器　終段電力増幅器は，アンテナに送信電波を送るため，大電力の増幅を行う部分で，送信用真空管が主として使われる。電力増幅回路は，電源効率の高いC級増幅で動作させることが多い。

電力増幅回路は，負荷がその真空管の動作によく整合したとき，負荷に最大の電力が供給される。図7の終段電力増幅回路では，変

図7　終段電力増幅回路

成器Tを調整して，増幅回路とアンテナの放射抵抗を整合させる。給電線があるときは，給電線のインピーダンスと整合させ，さらに変成器でアンテナと整合をとる必要がある。

中・短波帯では，増幅器として三極管または五極管が使われ，マイクロ波帯では，クライストロンや進行波管などが使われる。また，レーダ装置の送信管には，マグネトロンが使用される。

(3) 送信電波の規格

無線送信機からアンテナに送られ，空間に放射される電波は，他の通信回線へ混信しないようにする必要がある。そのため，**電波法**によって，電波の周波数偏差の許容値，占有周波数帯幅の許容値などが規定されている。さらに良質な無線通信を行うためには，送信電力を安定にし，変調波の直線性を良くして，ひずみを少なくすることなどが重要である。

3. 無線受信機

(1) 無線受信機の基本的な構成

無線受信機には，受信電波の周波数および変調方式によって，いろいろなものがある。それらを検波方式で大別すると，ストレート受信機とスーパヘテロダイン受信機とになる。

ストレート受信機　これは，アンテナで受信した電波を高周波増幅した後に，検波して信号を取り出す方式が使われている。この受信機は，図8のように，多数の到来電波の中から受信すべき電波を選択する同調回路，その高周波出力を増幅する高周波増幅器，低周波の信号成分を取り出す検波器および低周波増幅器などで構成されている。低周波増幅器は，低周波の信号成分が小さいときに用いる。

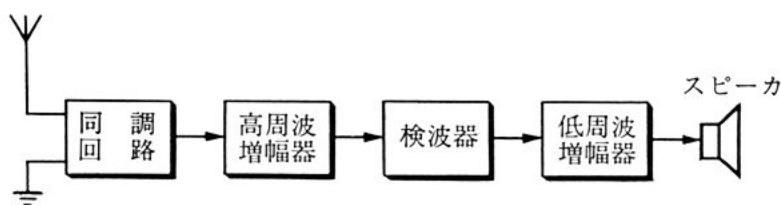



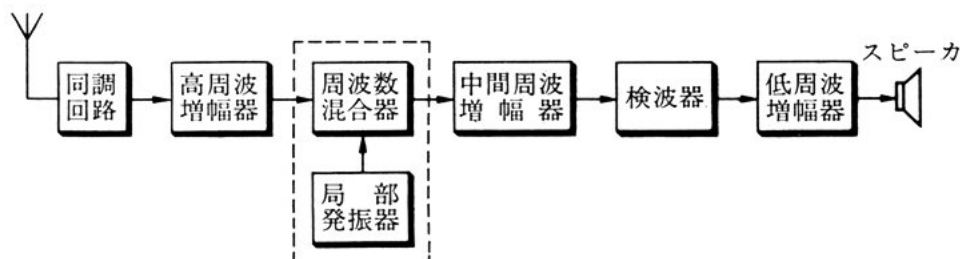
図8 ストレート受信機の構成

スーパヘテロダイン受信機 受信電波の弱い場合には，**スーパヘテロダイン方式**が用いられる。図9に，放送波受信機などに用いられる標準形スーパヘテロダイン受信機の構成を示す。

アンテナで受信された電波は，同調回路でインピーダンス整合および周波数選択が行われた後，高周波増幅器に入る。この出力は，周波数混合器に加えられ，局部発振器からの高周波と混合されて，中間周波信号に変換される。中間周波数に変換された受信信号は，中間周波増幅器でじゅうぶん増幅された後，検波器で検波される。検波器からの出力信号は，低周波増幅器で増幅されて，スピーカに加えられる。

放送波受信機では，局部発振の周波数をつねに受信周波数より中間周波数だけ高く保つため，同調回路と局部発振器の同調用可変コンデンサ（バリコン）を連動させて**単一調整**を行う。

通信用受信機では，周波数変換を2度行い，選択性と増幅度を大

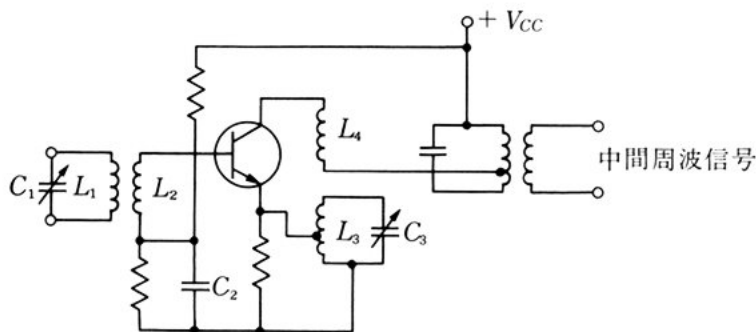
図9 標準形スーパヘテロダイン受信機の構成

きくすることがある。これを**ダブルスーパヘテロダイン方式**という。また，周波数の選択性を良くするため，水晶振動子などを利用した共振回路が用いられることもある。

（2） 無線受信機の回路

周波数変換回路　図9で周波数混合器は，受信周波数f_rと，局部発振周波数f_lとの二つの周波数の電波を，前に学んだように，ダイオードなどの非直線特性を利用して，中間周波数 $f_i=|f_r-f_l|$ の高周波を発生させる部分である。

図10は，放送波受信機などでよく用いられる周波数変換回路である。エミッタ回路の共振回路と，コレクタ回路とを結合して発振を起こし，得られる発振信号と，ベースに加えられたf_rの信号とが同じトランジスタの中で混合・検波され，中間周波が得られる。

影像妨害　スーパヘテロダイン受信機での中間周波数を455〔kHz〕とし，$f_r=590$〔kHz〕を受信するとき，局部発振周波数は$f_l=1045$〔kHz〕である。もし，この受信機に1500〔kHz〕の電波が到来し，周波数変換回路に入ると，この変換された周波数も455〔kHz〕であり，混信が起こる。このような現象を**影像妨害**といい，その周波数f_uを**影像周波数**という。受信周波数f_rに対して，f_uは次の式で与えられる。

図 10　周波数変換回路

$$f_u = f_r + 2f_i \qquad (5)$$

影像妨害は，L_1, C_1 の共振をある程度鋭くすることによって避けることができる。

中間周波増幅器　周波数変換によって生じた中間周波を増幅するのが中間周波増幅器で，**中間周波変成器**（IFT）が用いられる。また，増幅度を調整する**自動利得制御**（automatic gain contol: AGC）**回路**も用いられる。

検波器　増幅された中間周波信号から，変調された低周波信号を取り出す回路が**検波器**（detector）である。スーパヘテロダイン受信機では，直線検波が用いられる。

問 4. 放送用ラジオ受信機やテレビジョン受信機の中間周波には，どんな周波数が用いられているか調べよ。

（3） 無線受信機の性能

感　度　無線受信機の感度は，その形式・用途によっていろいろな表し方がある。受信した信号電力 S と，雑音電力 N との比を**信号対雑音比（SN比）**というが，感度は，出力におけるSN比が，基準デシベルに達するのに必要な入力電圧の大きさで表す。また，受信機の低周波出力端子では，受信機の内部雑音が加わるので，SN比は受信機入力端子でのSN比より低下する。このSN比低下の程度（**雑音指数**という）も受信機の性能を示す。希望する受信電波以外の混信電波や，外部からの雑音が入ることを避けるため，アンテナの指向特性も重要である。

選択度　希望する電波と不要電波とを，分離して受信する能力を**選択度**（selectivity）という。選択度は，高周波および中間周波増幅回路の周波数選択特性によって決まる。

このほか，受信機では，受信電波から，低周波信号をどれだけ忠

実に，ひずみを少なく再現できるかを表す**忠実度**（fidelity）や，電源電圧の変動，周囲温度の変化，機械的振動などに対する受信機性能の変動の少なさを表す**安定度**（stability）が重要である。

問 5. アンテナの端子出力（インピーダンス 200〔Ω〕）からの入力が 10〔μV〕，音声出力 1〔W〕のとき，この受信機の電力増幅度を dB で表せ。

4. 各種の送受信方式

（1） 無　線　局

電波は，図 11 のように，地球上をいろいろな形で伝わる。これを利用して，各種の無線通信方式が用いられている。

電波を利用して無線通信を行う場所を**無線局**といい，大別すると，固定局と移動局に分けられる。

固定局　固定局の業務には，国内および国外との公衆通信がある。国内の公衆通信には，マイクロ波またはミリ波を用いた無線通信が大部分を占めている。外国との公衆通信には，電離層屈折を利

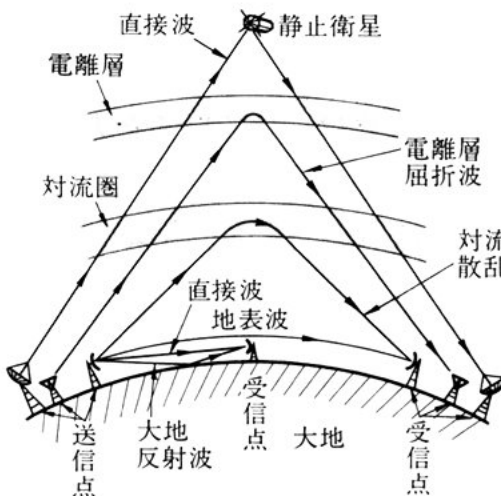



図 11 電波の伝わり方

電離層：地上100〔km〕以上の上空では，太陽エネルギーによって，酸素分子などがイオン化されている。

対流圏：地上十数〔km〕以下の対流圏では，空気の温度・気圧や水蒸気の量などの局所的な変化があり，電波が散乱することがある。

用する**短波通信**，対流圏散乱を利用する**見通し外通信**および**衛星通信**などがある。衛星通信は，赤道上の高さ 36000〔km〕に打ち上げられた通信用の静止衛星を経由して行われている。

各放送局による放送も，固定局の業務の例である。

移動局　無線局の位置を移動しながら，無線通信を行うのが移動局で，船舶局・航空機局・携帯局などがある。これらでは，通信のできる範囲の広い短波や超短波が使われている。

さらに，移動局と固定局の間の無線通信もあるが，この場合の固定局は陸上局とよばれ，海岸局・航空局・基地局などがある。衛星を利用する移動通信も，近年，実用化されてきた。

（2） 変調方式の種類

電気通信では，ある程度高い周波数をもつ信号の群を送ることによって，情報を伝えることが便利である。無線通信で，遠方まで空間を伝わるのは周波数の高い電波である。一方，通信において送りたい情報を表す信号波は，例えば音声などのように，比較的低い周波数をもっている。考えを簡単にするため，信号波は比較的周波数の低い正弦波であるとしよう。このような信号波は，周波数が低いため，電波として空間に放射することができない。

信号波のもつ情報を有効に伝送するような高周波信号群を作る操作を，一般に**変調**という。変調のしかたには，いろいろな方法があるが，次によく使われる変調方式の原理を説明する。

振幅変調方式　変調の最も基本的な方法は，図 12 のように，信号波に応じて振幅を変化させた高い周波数の正弦波を伝送する方法である。この方法が p. 71 で学んだ振幅変調である。変調波の周波数スペクトルは，図 13 のように，搬送周波数 f_0（搬送波），f_0+f_s（上側波），f_0-f_s（下側波）の三つの周波数成分に分けられる。

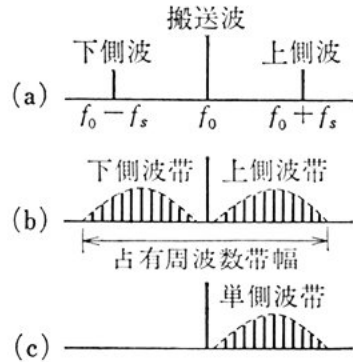
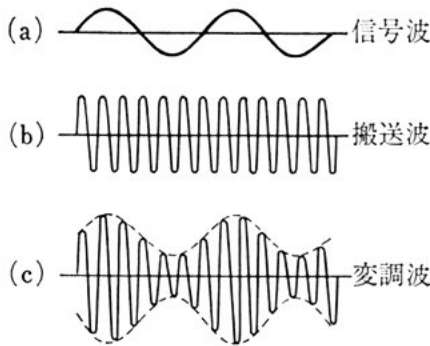



図 12　振幅変調波　　**図 13　周波数スペクトル**

例えば，図 12 (a) に示す信号波 ($i_s=I_s\sin 2\pi f_s t$) に従って，図 (b) の搬送波 ($i_0=I_0\sin 2\pi f_0 t$) の振幅を変化させると，図 (c) に示すように，振幅が信号波と同じ形で変化する変調波* i となり，式で示すと次のようになる。

$$
\begin{aligned}
i &= I_0(1+m\sin 2\pi f_s t)\sin 2\pi f_0 t \\
&= \underbrace{I_0\sin 2\pi f_0 t}_{\text{搬送波成分}} + \underbrace{\frac{mI_0}{2}\cos 2\pi(f_0-f_s)t}_{\text{下側波帯成分}} - \underbrace{\frac{mI_0}{2}\cos 2\pi(f_0+f_s)t}_{\text{上側波帯成分}}
\end{aligned}
\qquad (6)
$$

ここで，$m=\dfrac{I_s}{I_0}$ で，これを**変調度**という。

この搬送波と二つの側波帯をすべて伝送するのが，**両側波帯** (double sideband : **DSB**) **通信方式**である。変調波の占める占有周波数帯幅 B〔kHz〕は，次の式のようになる。

$$B=(f_0+f_s)-(f_0-f_s)=2f_s \quad \text{〔kHz〕}$$

f_0：搬送周波数〔kHz〕，f_s：信号周波数〔kHz〕

* 図 12 (c) の破線で示される曲線は，$I_0(1+m\sin 2\pi f_s t)$ で表され，この曲線の形は信号波と同じである。

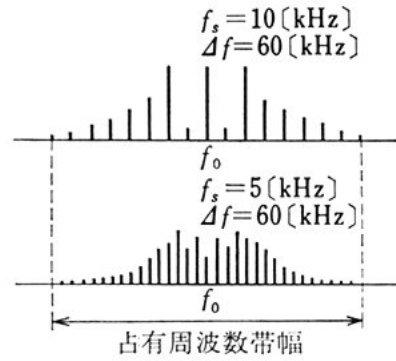
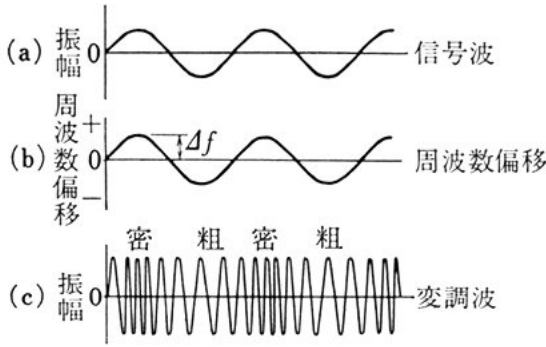



図 14　周波数変調波　　**図 15　周波数スペクトル**

また，搬送波および一方の側波帯を除去し，一つの側波帯だけ伝送する方式を**単側波帯**（single sideband : **SSB**）**通信方式**という。SSB 通信方式では，そのまま検波したのでは，元の信号波にもどらないので，DSB 通信方式に比べて変調部・復調部が複雑になるが，次のような利点がある。

1)　送信電力が $\frac{1}{4}$ ですむので，送信機とくに最終段増幅回路が安価になる。

2)　占有周波数帯幅が $\frac{1}{2}$ となり，電波に対する周波数利用度が 2 倍になる。

周波数変調方式　これは，振幅が一定の搬送波の周波数を，信号波に応じて変化させる変調方式である。

搬送波の周波数は，図 14 (a) の信号波の振幅に比例して，図 (b) だけ偏移するので，周波数変調波は図 (c) のようになる。周波数変調波は，周波数が高くなると波形が密になり，低くなると疎になる。

変調波のスペクトルは，図 15 のように，側波は無限の周波数成分を含むが，通信に必要な帯域幅 B は $2(\Delta f+f_s)$ でよいことがわかっている。周波数変調方式は，振幅変調方式に比べて，占有周波数帯幅は広くなるが，伝搬中に混入した雑音を除去しやすいので，

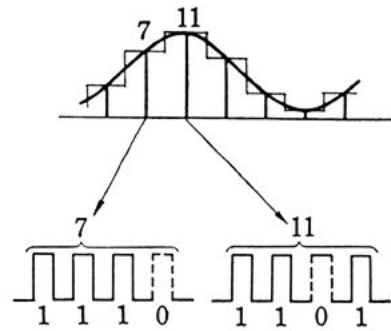
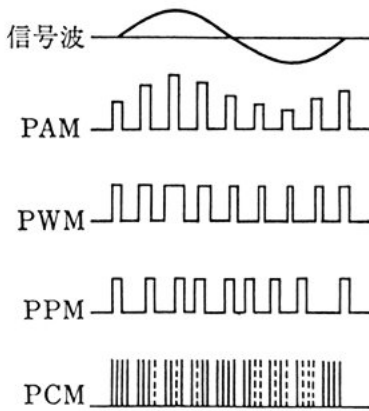



図 16 パルス変調の種類 …… 図 17 パルス符号変調の例

良質な伝送を行うことができ，FM 放送のように VHF 以上の高い周波数でよく用いられる。

パルス変調方式　図16のように，パルス列の形を信号波に応じて変化し，ふつうこれで搬送波を変調して伝送する方法をパルス変調方式という。信号波を一定間隔で区切り，区切り点の信号波の中央値をとびとびにとって，信号波を代表させることを**標本化**という。標本化された信号波の値に従って，パルス列を変調する方法には，次のような種類がある。

パルス振幅変調（PAM）　パルスの振幅を変化させる。
パルス幅変調　（PWM）　パルスの幅を変化させる。
パルス位相変調（PPM）　パルスの位相を変化させる。
パルス符号変調（PCM）　信号波の各値をパルス符号で表す。

PCM は，電子計算機で学ぶような一定の2進符号を使って，図17のように，代表値を符号化する方式であり，雑音やひずみをじゅうぶんに取り除くことができるという特徴がある。

（3） SSB 変 調 方 式

SSB 方式の変調には，図 18 (a) のトランジスタ平衡変調回路，図

（a）トランジスタ平衡変調回路　　（b）リング変調回路

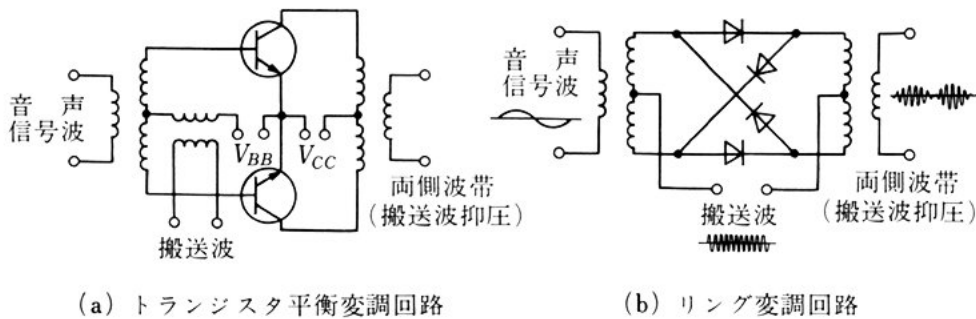



図 18　SSB 変調回路

(b)のダイオードを用いたリング変調回路が用いられる。これらの回路に，信号波と搬送波が加わると振幅変調され，両側波帯が得られるが，搬送波は出力回路に現れないように工夫されている。得られた両側波帯のある振幅変調波は，単側波帯だけを通すフィルタを通して，単側波帯とする。

（4）　FM 送受信方式

アンテナから放射された電波が空間を伝搬する間には，電波の減衰の模様が時間的に変わるため，受信機入力が大きく変動したり，雑音が受信電波に重なり合ったりする。FM 方式は，信号波の質を下げることなく，リミッタ回路によって，変動成分や雑音成分を除去することができる。

変復調回路　図 19(a)は，発振回路の共振回路に可変容量ダイオード D を入れて，信号波の振幅に応じて D の静電容量を変えることによって，発振周波数を変えるものである。

図(b)は，周波数変調の復調に使われるフォスターシーレ弁別回路とよばれる検波回路である。図の一次側と二次側は，相互インダクタンス M で結合され，L_1, C_1 と L_2, C_2 は，周波数変調波の中心周波数 f_0 に同調させてある。検波用ダイオード D_1, D_2 に加わる電圧 $\dot{V}_A$, $\dot{V}_B$ は，$\dot{V}_1$ と $\dfrac{\dot{V}_2}{2}$ の和と差であり，検波される出力電圧 $\dot{V}_o$

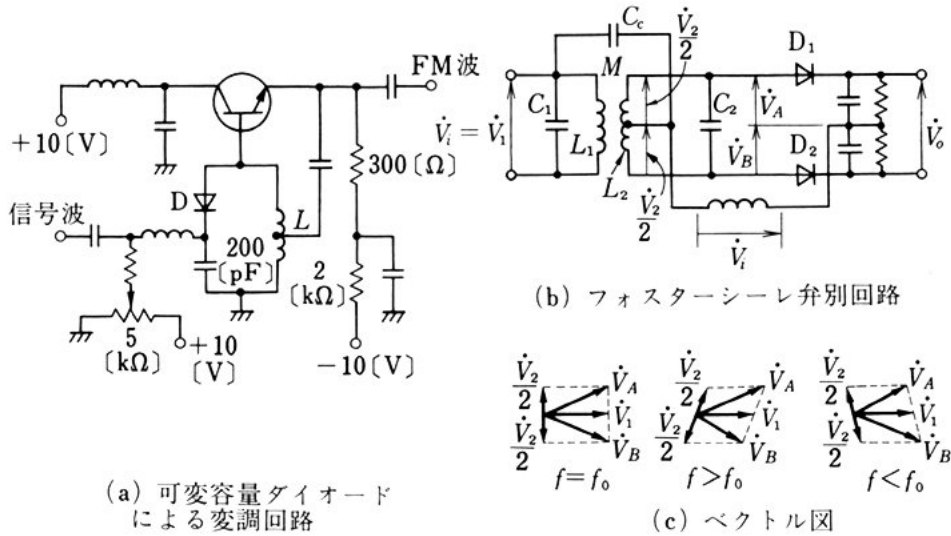



図 19　変 復 調 回 路

は，$\dot{V}_A-\dot{V}_B$ に比例する。

入力周波数 f が f_0 と等しければ，$\dot{V}_o$ は0であるが，図(c)のベクトル図のように，f が f_0 からずれるに従って，$\dot{V}_1$ と $\dot{V}_2$ の位相がずれるので，$\dot{V}_o$ は周波数の変化に従って変わる。

自動周波数制御回路　FM方式では，周波数変動率が低周波信号波の品質に大きく影響するので，周波数変動率を向上させるため，水晶発振器を使って周波数を安定にする**自動周波数制御**（automatic frequency control: **AFC**）**回路**が使われている。

（5） トランシーバー

トランシーバーは，簡易形移動無線装置で，中間周波回路・低周波増幅回路などは送受信共通とし，送信の最終段増幅回路と受信の初段高周波増幅回路，および音声周波の入出力回路をスイッチで切り換える**プレストーク方式**によって送受信を行っている。一般には，FM変調方式が使われる。

（6） 多 重 通 信 方 式

多重通信方式は，電話回線の需要増加や長距離テレビジョン中継

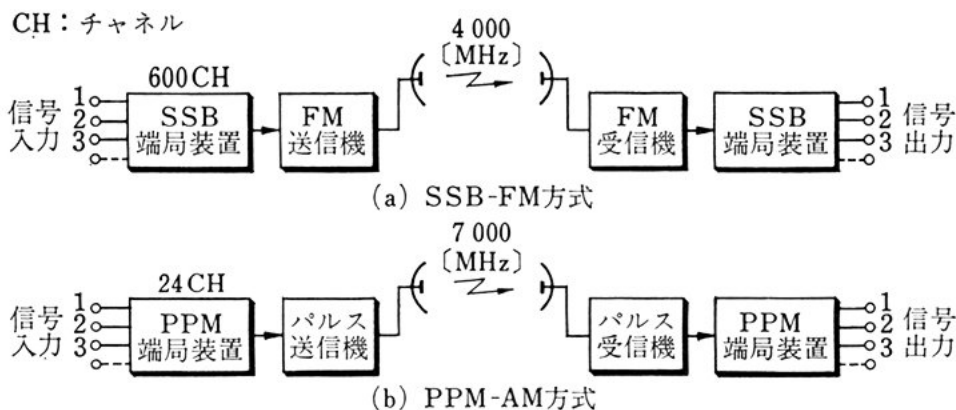



図 20　多重送受信装置

回線の実用化に対処するための方式で，マイクロ波無線中継回線で使われている方式である。

搬送通信方式　一つの通話路で多数の電話回線を伝送する方式を搬送通信方式という。図20のように，いくつかの音声周波信号波をSSB方式やPPM方式により搬送波にのせるさいに，各信号波に対する搬送周波数を少しずつずらしておき，これらをまとめ，さらに無線周波を変調する（群変調）方式で，大容量の伝送手段として，きわめて能率が良い。

衛星通信方式　地球の赤道上で高度36000〔km〕に打ち上げられた人工衛星の公転周期は，地球の自転周期と同じであるため，地球からはつねに定まった向きに見える。衛星通信は，この人工衛星内に設置された送受信用アンテナおよび送受信機を利用する通信方式である。現在，実用化されている方式では，地球局からの送信電波は6〔GHz〕，受信電波は4〔GHz〕が用いられている。また，地球局のアンテナは，直径20〔m〕程度のカセグレンアンテナなどが多く使用されている。

この方式によって，国際通信での大容量通信回線を確保できるよ

うになり，国際間のテレビジョン通信も可能となった。この通信方式は，回線の需要が増加しているため，ミリ波通信の実用化も検討されている。

問 6. 無線受信機における FM 方式と SSB 方式の特徴を挙げよ。

5

問　　題

1. 電波が曲がって進むのは，どのような場合か。

2. テレビジョン受信用アンテナとしてよく使われている八木アンテナについて調べよ。

3. 変調度とは何か。

10 **4.** 短波・超短波・極超短波・マイクロ波が，どんな業務の固定局に使用されているか調べよ。

5. 水晶振動子は，無線通信の送受信機でどのように使われているか。

6. 10〔MHz〕の水晶発振器の周波数変動率が 10^{-6} であれば，変動量はどのくらいか。

15 **7.** 水晶発振器がどのような機器で実用されているかを調べよ

8. 電波の電界強度が 10〔mV/m〕であると，この電波のポインチング電力はいくらか。

9. アンテナの実効長および放射抵抗とは何か。

10. 負荷抵抗の整合をとることは，どんな意味があるか。

20 **11.** スーパヘテロダイン受信機での影像妨害とは何か。

4 画像機器

この節のねらい　電子技術は，電気通信に利用されるだけでなく，いろいろな物理量の測定にも広く応用されている。

ここでは，電波の反射を利用して，空間中で目標物までの距離やその形状を測定するレーダ，および超音波を利用して，水中において目標物までの距離やその形状を測定するソナーについて学ぶ。どちらも測定された結果は，ブラウン管上に画像として示される。

1. レ ー ダ

(1) 原 理 と 構 成

レーダ(radio detection and ranging: **RADAR**)は，電波を発射し，その反射波を受信して，目標物の位置・速度などを検出する装置である。

図1は，レーダの基本的構成を示したものである。送信機は，パルス波で変調した電波を金属製の管（導波管）の中に導き，アンテナに送り込む。アンテナは，先鋭な指向性をもち，電波を細いビームにして送り出す。電波は，物体などがあると反射してもどってくるので，その反射波を同じアンテナで受けて受信機に送り込む。受信

図1 レーダの構成

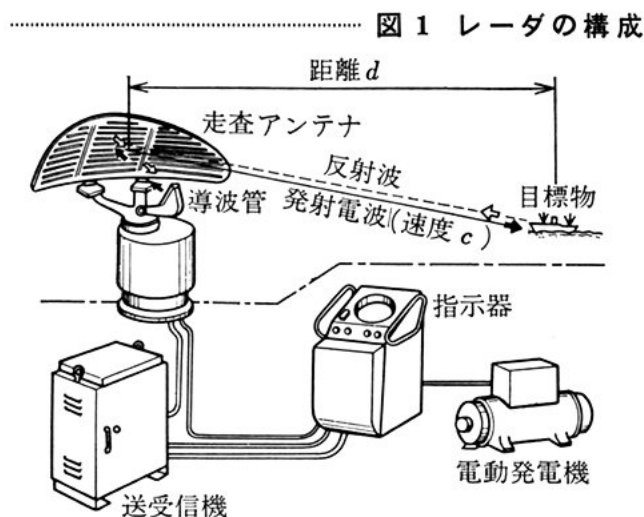
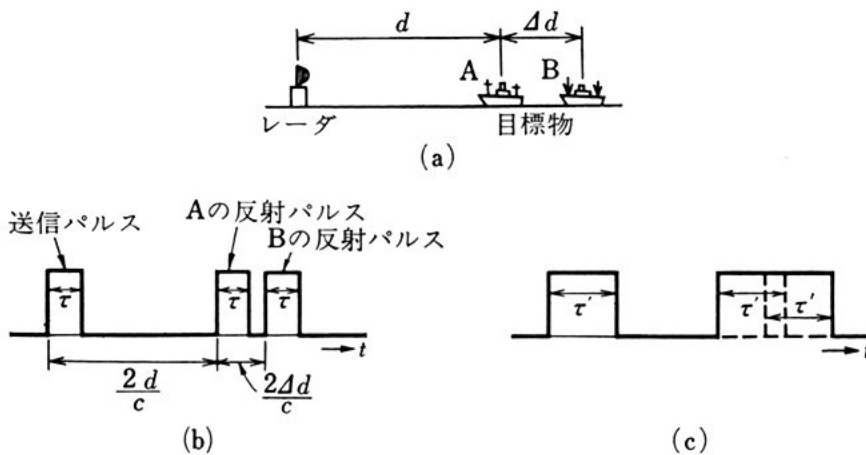



図 2 パルス幅と二つの物体の識別

機によって復調された反射波は，指示器に表示される。指示器には，ふつうブラウン管が用いられている。

レーダによる距離の検出は，パルス波を送信し，反射してもどってくるまでの時間を測定して行う。送信してからもどるまでの時間を $\varDelta\tau$〔s〕，光速度を c〔m/s〕とすれば，距離 d〔m〕は，次の式のようになる。

$$d=\frac{c}{2}\varDelta\tau \qquad (1)$$

二つの物体からの反射波を受けた場合，どの程度の距離だけ離れていれば，二つの物体として識別できるかを**距離分解能**という。距離分解能は，送信するパルスの幅によって決まる。

いま，図2(a)のように，二つの物体が距離 $\varDelta d$ だけ離れている場合，二つの物体を電波が往復するのに要する時間は $\frac{2\varDelta d}{c}$ となる。そこで，$\frac{2\varDelta d}{c}$ より小さなパルス幅 τ の場合は，図(b)のように，二つの反射波は識別できるが，$\frac{2\varDelta d}{c}$ より大きなパルス幅 τ' の場合には，図(c)のように，二つの反射波は重なり合って識別できない。

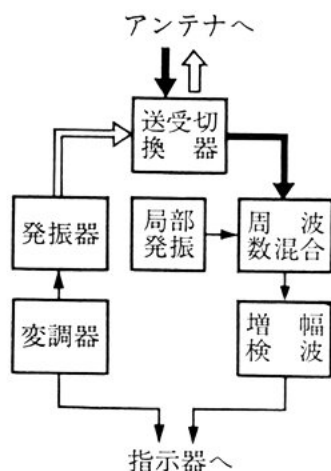
問 1. パルス幅 0.4〔μs〕のとき，距離分解能は何メートルか。

(a) 送受信機の構成　(b) マグネトロン　(c) クライストロン

図3 送受信機

(2) アンテナと送受信機

レーダには，ふつう波長1～3〔cm〕程度のマイクロ波かミリ波の電波が用いられる。アンテナは，電波を反射器によって細いビームにして送信するとともに，反射波を集める働きをする。位置測定レーダでは，アンテナを15～30〔rpm〕で回転させて，すべての向きにある物体を検出する。このようなアンテナを，**走査アンテナ**という。

送受信機は，図3(a)のような構成である。発振器は，図(b)に示すような**マグネトロン**(magnetron)とよばれる，マイクロ波を発振する特殊な電子管を用いており，この発振器の出力は，変調器でパルス波に変調される。受信部はスーパヘテロダイン方式であり，局部発振には，図(c)に示す**クライストロン**(klystron)とよばれる電子管が使われる。得られた中間周波は，増幅・検波され，指示器に送られる。

(3) 指　示　器

レーダによる信号の表示方式には，Aスコープ・PPIスコープなどがある。

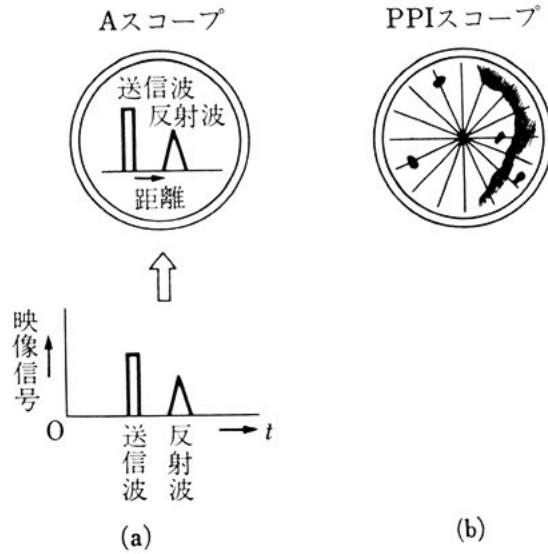



図4 表 示 方 式

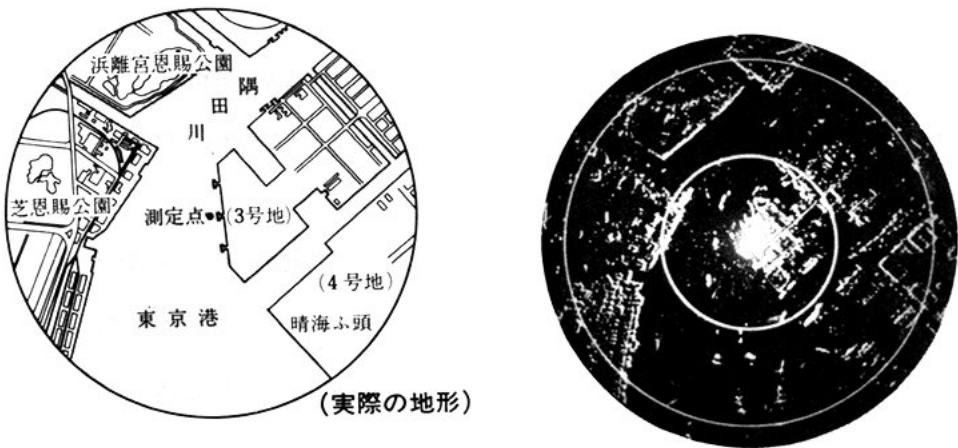



図5 PPIスコープの画像

Aスコープは，レーダの初期に利用されたもので，図4(a)のように，ブラウン管の電子ビームを水平に走査しておき，表示された送信波と反射波の二つのパルスの間隔から距離が示される。

PPIスコープ (plain position indication scope) は，電子ビームをブラウン管の中心から周辺に走査すると同時に，走査線をアンテナと同期して回転することによって，中心から放射状に距離軸をとるようにしたもので，すべての向きの反射物体の関係位置を知ることが

できる。

問 2.　PPI スコープで距離を知るには，どこの間隔を読めばよいか。

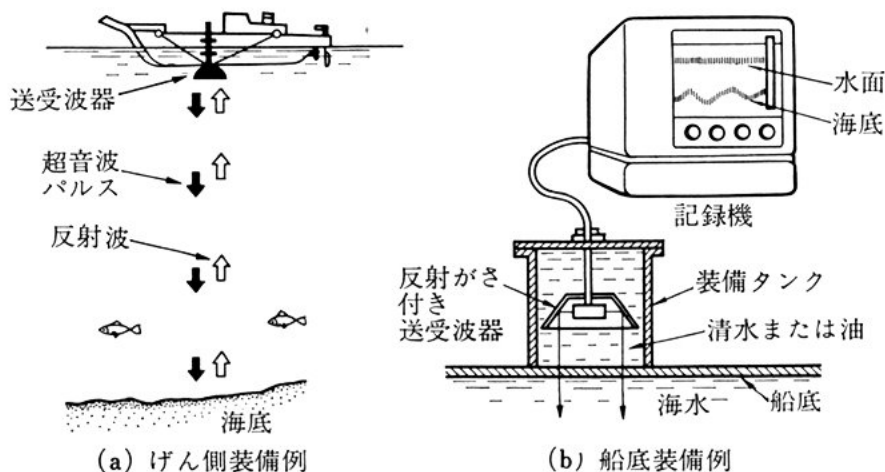
2.　ソ　ナ　ー

(1)　ソ　ナ　ー

人間が聞くことのできる可聴周波数範囲は，20〔Hz〕～20〔kHz〕であり，これより周波数の高い音を**超音波** (ultrasonic wave) という。超音波技術は，音波の応用技術であるため，気体・液体・固体など，いかなる物質の中でも利用できる。例えば，超音波を水中に放射して，レーダと同様な原理により，水中における目標物の発見，水深の測定などに用いられる装置を**ソナー** (sound navigation and ranging: **SONAR**) という。すなわち，電波の代わりに超音波を用いたレーダである。

ソナーには，図 6 のように，船底から超音波のパルスを発生し，目的物から反射音がもどるまでの時間を測定し，水深を測る**音響測深機**，魚群を目的とした**魚群探知機**，PPI スコープで水中目標など

図 6　ソナーの構成

(a) げん側装備例　(b) 船底装備例

を表示する**水平ソナー**などがある。

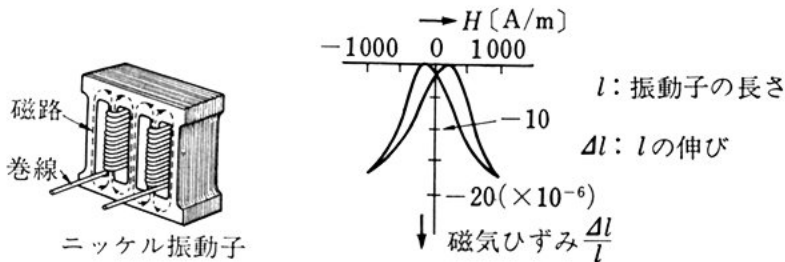
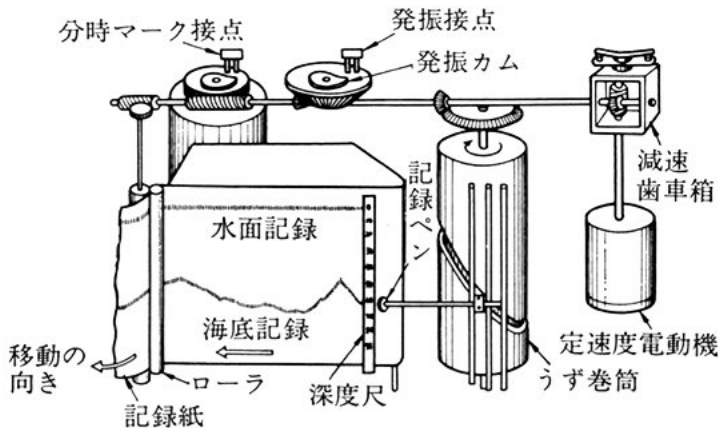
問 3. 水平ソナーは，どのような目的に用いられるか。

（2） ソナーの構成要素

ソナーは，超音波発生部・受波部・記録装置から構成されている。

超音波の発生には，電気信号を機械振動に変換する振動子を用いている。振動子には，水晶・ロシェル塩などの圧電振動子，チタン酸バリウムなどの電気ひずみ振動子，ニッケル・フェライトなどの磁気ひずみ振動子などが用いられている。図 7 (a) は，ニッケル振動子と，その磁気ひずみの特性例である。

送波部の周波数は，振動子の固有振動の周波数によって決まり，駆動用の電気信号の周波数を固有振動周波数に一致させて，共振を

図 7 ソナーの構成要素

(a) ニッケル振動子の磁気ひずみの特性例

(b) 記録機の構造の例

利用し，強い振動を発生させる。

受波部は，振動子に超音波の反射波を加えることによって発生する電圧を増幅して，反射波を検出する。送波部と受波部の検出素子は，共通なので，送信と受信を自動的に切り換えるようになっている。

図(b)は，記録機の構造の例である。記録ペンは，うず巻筒によって定速で走行しており，ペンが水面位置にあるとき，発振接点が閉じて超音波のパルスが発振され，反射波を受信した時点でペンが記録紙に触れ，深度を記録する。

問 4.　図7(a)で，$l=2$〔cm〕，$H=1000$〔A/m〕のとき，Δl を求めよ。

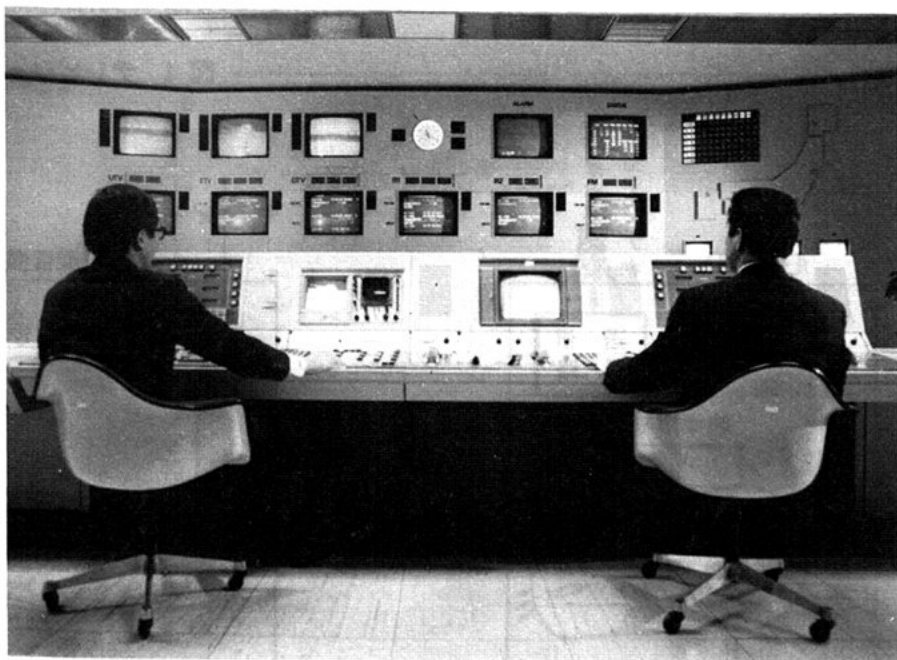
問 5.　レーダとソナーとはどのように違うか。

問 6.　距離分解能を良くするには，どのようなパルスを使えばよいか。

第5章 テレビジョン

有線通信・無線通信は，電信・電話・ラジオ放送・テレビジョン放送としてめざましい発達をとげたが，そこに用いられる技術は，電気通信以外の分野にも及び，いまでは，有線通信・無線通信は，広範な電子工学の一分野にすぎないようになった。これに伴って，電子機器の種類も非常に多くなっている。

この章では，テレビジョンを中心に，画像の送受のしくみと主要な機器についてのあらましを学ぶことにする。

テレビジョン放送局の主調整室

テレビジョンの基礎

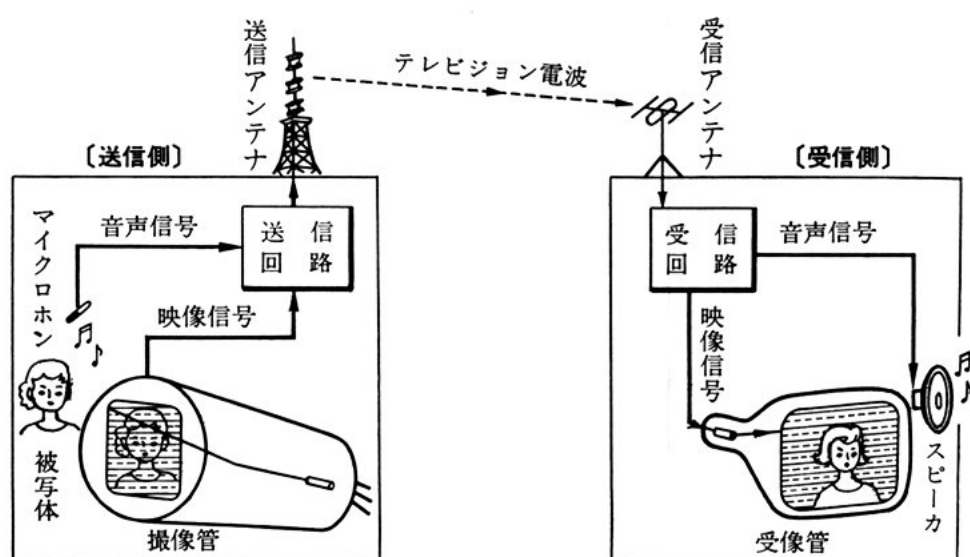
この節のねらい　テレビジョンは，光の明暗からなる画像を分解し，電気信号に変換して送信し，受信した電気信号を光の明暗にもどして，再び画像に組み立てるしくみになっている。

ここでは，画像の分解とは具体的にどのようなことか，画像の組み立てとはどのようにすることかなどについて，そのあらましを学ぶ。

1. テレビジョンの原理

(1) 送信・受信のしくみ

図1は，テレビジョンのしくみのあらましを示す。送信側では，送ろうとする被写体をテレビジョンカメラの中に収められた**撮像管**とよばれる電子管でとらえて画像とし，その画像の明暗に応じた電

図1　テレビジョンの原理

気信号（**映像信号**: video signal）に変換する。映像信号は，マイクロホンからの音声信号とともに送信装置に送り，送信アンテナから電波にのせて送信する。

受信側では，この電波を受信し，受信回路で映像信号と音声信号に分離する。映像信号は，**受像管**とよばれるブラウン管で光の明暗に変えて画像として再現し，音声信号は，スピーカで音に変える。

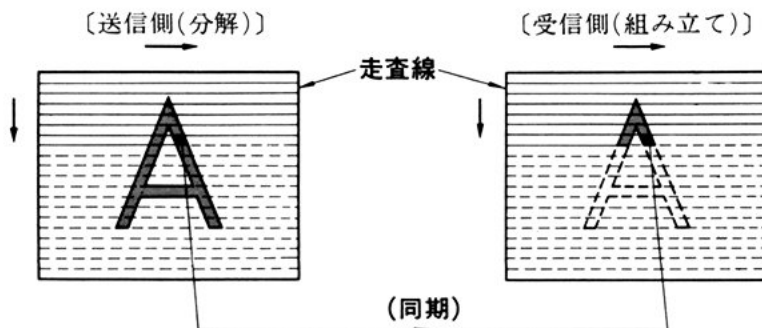
テレビジョンは，放送のほかに産業用・医療用・教育用など，多くの面に幅広く活用されている。

問 1. テレビジョンが放送以外で利用されている例を挙げよ。

（2） 走　　査

受像管の画像に目を近づけると，たくさんの横線が見える。これは，送信側で撮像管でとらえた被写体の像を含む画面を，ちょうど横書きの本を読むように，左から右へ，また上から下へ，一定の速度で，読み取ることにより分解し，受信側ではこれを受像管上で同じ順序に組み立てて画像を再生しているからである（図2)。

このように，一つの画面を一定の順序に従って分解したり組み立てたりすることを**走査**（scanning）といい，このうち，左右方向の分解・組み立てを**水平走査**，上下方向の分解・組み立てを**垂直走査**という。また，走査された画面を**フレーム**，走査によって生ずる横線を

図 2　画面の分解・組み立て

走査線といい，１フレームは多数の走査線からなりたっている。

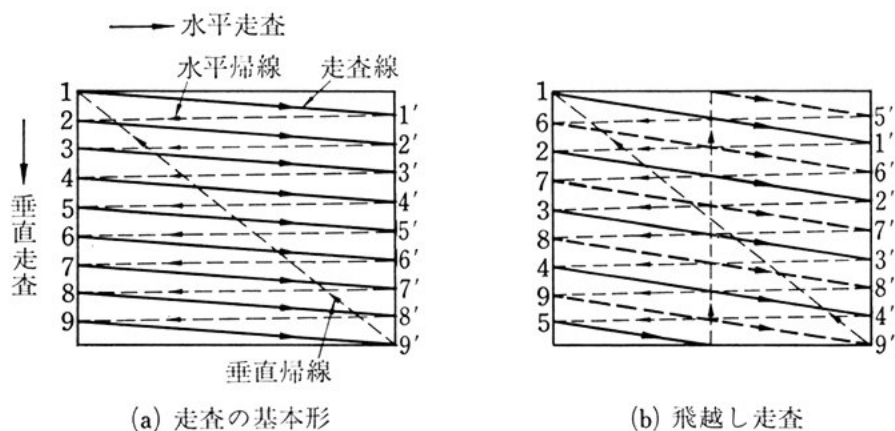
送信側で分解された画面を受信側で同じ順序に組み立てるためには，両者の走査を一致させる必要がある。これを**同期**（synchronization）という。

図3(a)に示すように，水平走査は左から，垂直走査は上から始めるので，各走査は１回終わるごとに直ちに初めの位置にもどる必要がある。もどるとき生ずる線を**帰線**といい，水平・垂直両方向の帰線をそれぞれ水平帰線・垂直帰線という。また，走査に必要な期間を**走査周期**，このうち実際に走査している期間を**走査期間**，帰線のための期間を**帰線期間**という。

なお，後で学ぶように，帰線が画面に現れないよう，帰線期間の映像信号は黒に相当するレベルに保っている。この期間を**帰線消去期間**という。

走査は，画面のちらつきをなくし，また，動いている被写体の像を再現するため，毎秒25フレーム以上の速さで走査を行っている。実際のテレビジョンでは，画面のちらつきを減らすため，一つの画面を２回垂直に走査する**飛越し走査**という方法を用いている。こ

図3　走査

(a) 走査の基本形

(b) 飛越し走査

れは，図3(b)に示すように，1回目は走査線の間隔をあけて粗く走査し，2回目は最初の走査線の間に入る走査線で走査する方法である。この方法で1回走査された画面を**フィールド**という。したがって，飛越し走査の場合，1フレームは2フィールドからなりたっている。

我が国のテレビジョン放送では，走査線525本（垂直帰線期間を含む），フレーム数毎秒30，フィールド数毎秒60となっている。したがって，垂直走査周期は$\frac{1}{60}$〔s〕，水平走査周期は$\left(\frac{1}{30}\right)\times\left(\frac{1}{525}\right)$$=63.5\times10^{-6}$〔s〕=63.5〔μs〕となる。これらを繰返し周波数（**走査周波数**）で表すと，垂直が60〔Hz〕，水平が15.75〔kHz〕となる。

また，帰線消去期間は，走査周期に対して垂直が約7〔%〕，水平が約18〔%〕の割合となっている。

問 2. 画面に現れる走査線数は何本になるか。

（3） 映 像 信 号

撮像管は，被写体像を走査によって分解し，各部分の光の強弱に応じた電気信号（映像信号）に変換する。このとき，1回の水平走査に対応する映像信号は，図4(a)に示すように，その走査線上の光の明暗を表す成分からなっており，1フレームの映像信号は，図(b)に示すように，このような信号が順に並んだものになる。この信号で，画面の完全に暗い部分に対応するレベルを**黒レベル**，最も明るい部分に対応するレベルを**白レベル**という。

帰線期間は前に学んだように，黒レベルにして帰線消去を行い，この部分（帰線消去期間）に次の項で学ぶ同期信号を付加する。映像信号とは，ふつう，同期信号が付加された形のものをいう。

映像信号のもつ周波数成分は，走査が速いほど，また，図(c)に示すように画面上の明暗の変化の回数が多いほど高くなる。とくに，

(a) 水平走査で得られる映像信号

(c) 画面の細かさと映像信号

(b) 1フレームの映像信号

図 4 映像信号（同期信号なし）

水平方向の走査は速いので，この方向の細かい明暗の変化があると，数メガヘルツといった高い周波数成分をもつようになる。

また，画面全体の明暗は，逆に低い周波数成分に対応するが，この明暗の変化はきわめて遅く，ふつう，数秒から数十秒以上になるので，低い周波数成分は直流になる。

このため，映像信号の伝送には，音声信号に比べて非常に広い周波数帯域が必要である。我が国のテレビジョン放送では，映像信号の最高周波数は 4.2〔MHz〕となっている。

問 3. 映像信号の高い周波数成分が伝送されないと，受像画面はどうなるか。

(4) 同 期 信 号

受像画面の走査を送像画面の走査と一致させるために，送信側から送る信号を**同期信号**といい，映像信号の帰線消去期間に付加して送られる。

同期には，水平走査を一致させる**水平同期**と，垂直走査を一致させる**垂直同期**とが必要で，水平同期のための信号を**水平同期信号**，垂直同期のための信号を**垂直同期信号**という。

図5(a)は同期がとれた受像画面で，正しい画面が再生されているが，図(b)は水平同期が，図(c)は垂直同期がとれていない受像画面で，いずれも正しい画面が再生されていない。

図6は，水平走査期間の映像信号の波形を示している。

図5 同　　期

図6 映像信号と水平同期信号の波形

水平同期信号は，図6のような幅と振幅の水平同期パルスからなり，このパルスは水平走査が始まる時刻を示し，水平帰線消去期間に付加される。図の H は，水平走査周期を示している。

垂直同期信号も水平同期信号と同様に，パルス信号で構成され，図7(a)に示すように，1フィールドの走査が始まる時刻を示し，垂直帰線消去期間に付加されている。垂直同期パルスには，水平同期パルスと区別するため，幅の広いパルスが使われるが，実際の垂直同期信号は，図(b)に示すように，垂直同期パルスと等化パルスからなる複雑な波形が使われる。

等化パルスは，飛越し走査を完全に行わせるためのものであり，垂直同期パルスの切れ込みは，垂直同期期間でも水平同期が行われるようにするためのものである。

問 4． 同期がとれずに，横に伸びた像が同時にいくつも受像されることがある。水平と垂直のどちらの同期がわるいのか。

図 7　垂直同期信号

(a) 映像信号と垂直同期パルス

(b) 実際の垂直同期信号

2. テレビジョン送受信装置

(1) 撮　像　管

放送に使われる撮像管には，さまざまの形があり，用途に応じて使い分けられている。スタジオで使われる撮像管は，直径2.5〔cm〕のものが多く，小形のカメラでは，直径1.7〔cm〕のものが使われている。

図8は，代表的な撮像管の外観とその構造である。図(b)に示すように，ガラス円筒の一端に平面のガラス板がある。これを**フェースプレート**という。フェースプレートの内面には，透明導電膜と光導電

図 8　代表的な撮像管の外観とその構造

膜からなる**ターゲット**があり，光学レンズで結ばれた被写体の像は，光導電膜に結像する。光導電膜に対向して，電子ビームを放出する**電子銃**（electrongun）がある。光導電膜は，光が当たると導電性が増す性質があるので，像の明暗に応じて膜の厚さの方向の抵抗が変わる。したがって，電子銃で光導電膜を走査すると，像の明暗に応じた電流が，透明導電膜との間に流れ，これが映像信号として取り出される。撮像管の外側には，電子ビームを集束したり，走査するための集束コイルや偏向コイルなどが取り付けられている。

（2） テレビジョン送信装置の構成

図9はテレビジョン送信装置の構成である。テレビジョンカメラの中の撮像管でとらえられた画像は映像信号に変えられ，映像信号増幅器で増幅されるとともに同期信号が付加されて映像送信機に送られる。同期信号は撮像管の走査のためにも使用する。映像送信機は，映像信号を電波として発射するための搬送波（映像搬送波）の発振器と，この搬送波を振幅変調するための変調器からなっている。映像信号で変調された搬送波を**映像搬送波信号**という。

図9 テレビジョン送信装置の構成

マイクロホンでとらえられた音声信号は，音声信号増幅器で増幅されて音声送信機に送られる。音声送信機は，映像送信機と同様に，搬送波の発振器と変調器からなっているが，変調器は周波数変調を行う点が映像送信機と異なる。音声信号で変調された搬送波を**音声搬送波信号**という。

映像送信機と音声送信機の出力，すなわち映像搬送波信号と音声搬送波信号は，ダイプレクサとよばれる結合器で結合されて，VHF あるいは UHF のテレビジョン電波として，同一の送信アンテナから発射される。

（3） テレビジョン放送局

図 10 (a) はテレビジョン放送局の送信系統の例である。

テレビジョン放送の番組は，1) スタジオでの映像・音声の生放送，2) 映画フィルムやビデオテープなどに録画されたものの再生放送，3) 局外での番組の中継放送，4) 他局の番組の中継放送の 4 種類を組み合わせて構成される。

図 10 テレビジョン放送局

(a) 送信系統の例

(b) スーパターンスタイルアンテナ

図 11　実際のテレビジョン電波

図(b)は，VHF テレビジョン放送用アンテナの一種で，**スーパターンスタイルアンテナ**である。

（4）　テレビジョン電波

図 11 (a) は，映像搬送波を映像信号で振幅変調したようすである。映像信号の側波帯は図 (b) のようになるが，帯域幅を節減するため，下側波帯の破線の部分を除いた**残留側波帯方式**で送信する。また，音声信号は映像搬送波より 4.5〔MHz〕高い周波数の搬送波を周波数変調して送信する。テレビジョン電波 1 チャネル分の帯域幅は，図 (b) に示すように 6〔MHz〕になっている。

（5）　テレビジョン受像機の構成

図 12 に白黒テレビジョン受像機の構成を示す。受像機の回路は，大別すると，1) 受信したテレビジョン電波から映像搬送波信号を取り出して検波・増幅し，この信号を受像管に加える**映像回路**，2) 映像回路の途中から音声搬送波信号を取り出して検波・増幅し，スピーカを動作させる**音声回路**，3) 映像回路の途中から同期信号を取り出して，この信号に同期した水平・垂直の偏向電流を作り，こ

図 12　白黒テレビジョン受像機の構成

の電流を受像管の偏向コイルに流す**同期および偏向回路**の三つの回路から構成されている。

図12のように，音声搬送波信号と映像搬送波信号を映像中間周波増幅回路で同時に増幅し，途中から分離する方式を**インタキャリア受信方式**という。

（6）受　像　管

図13は，白黒用受像管の外観とその構造を示したものである。

けい光面は図(b)に示すように，ガラス内面に塗布されたけい光体と，それをおおう**メタルバック**という薄いアルミニウム膜からなっている。けい光体は，電子ビームの衝撃で発光する微小な結晶粒子であり，メタルバックは，陽極として電子を吸収するとともに，けい光体の発光を前面に反射させて明るさを増すためにつけられている。

電子銃は，電子ビームを発生させる円筒状の装置で，図のように，ヒータ (H)・カソード (K)・制御グリッド (G_1)・加速グリッド (G_2, G_3, G_5)・集束グリッド (G_4) からできている。カソードから放出された熱電子は，これらのグリッドで細い電子ビームとなり，

(a) 受 像 管

(b)

図 13 受像管（白黒用）**の外観とその構造**

加速グリッドで加速されてけい光面に衝突し，アルミニウム膜を通り抜けてけい光体を発光させる。集束グリッドは，加速グリッドとの間の電界の作用によって，ちょうど光学レンズが光を集束するように，電子ビームをけい光面に集束させる働きをする。制御グリッドは，その電圧によって，熱電子の量を制御し，発光の明るさを変化させることができる。

(a) 電磁偏向　(b) 静電偏向

図 14 偏向の原理

陽極電圧は，アノードボタンから内部導電膜を通して加速グリッドとメタルバックに加えられる。けい光面でじゅうぶんな明るさを得るため，陽極には 10～15〔kV〕の高圧が加えられる。

(7) 偏向の原理

電子ビームは，電界や磁界を通るとき，その影響を受けて，進行する向きが変わる性質がある。これを**偏向** (deflection) という。図 14 (a) のように，偏向コイルに電流を流して磁界を作り，その磁界の強さや向きを変えることによって，電子ビームを電磁的に偏向させる方式を**電磁偏向**という。また，図 (b) のように，偏向板に電圧を加えて電界を作り，その電界の強さや向きを変えることによって，電子ビームを静電的に偏向させる方式を**静電偏向**という。

電子ビームを水平および垂直に走査させるためには，水平方向の偏向（**水平偏向**）と垂直方向の偏向（**垂直偏向**）とが必要である。

受像管では，電磁偏向が用いられ，このための水平偏向コイルと垂直偏向コイルがガラスバルブの外側に取り付けられている。前に

学んだ撮像管の偏向にも電磁偏向が用いられ，静電偏向は，テレビジョンでは，一部の撮像管以外には使用されていない。

電磁偏向で画面を一定速度で走査するには，偏向角度が時間に比例して増加し，走査が終わればすぐにもどるような磁界を電子ビームに加えればよい。このためには，偏向コイルにのこぎり波状電流を流せばよい。

問 5. 偏向のしくみについて述べよ。

3. カラーテレビジョン

(1) 色の性質

カラーテレビジョンの理解に必要な色について考える。

われわれの目は，紫から赤まで，波長でいえば 380～780〔nm〕の光に対して感じる性質があり，この範囲の電磁波を**可視光線**という。人間の目は，この波長範囲の光をすべて同じに感じるのではなく，波長が異なれば感じ方も異なってくる。このような光の波長の違いによる感じ方の違いを表すのに，**色**という表現が用いられる。

色が濃かったり，うすかったりするときの色のあざやかさの度合いを**彩度**といい，波長によって感じる色あいの違いを**色相**，明るさに対応する測光量を**輝度**（または明度）という。

(2) 色の混合と三原色

赤と緑の光を混ぜると黄色になり，さらに青い光を加えると白色になる。また，加える光の強さを加減すると，三つの色の光から，いろいろな色が作り出せる。これは色の三原色説として知られている現象で，ほとんどの色は，三つの色の光の混合によって表わすことができる。この三つの色を**光の三原色**という（図 15 (a)）。

(a) 光の三原色の混合

三原色 ＼ 混合で得られる色	赤	緑	青
赤	1	0	0
緑	0	1	0
青	0	0	1
黄	1	1	0
マゼンタ	1	0	1
シアン	0	1	1
白	1	1	1

(b) 光の三原色の混合で得られる色の例

図 15 光の三原色と混合

三原色には，どの色を選んでもよいが，なるべく多くの色を得るため，テレビジョンでは，赤・緑・青が選ばれている。これらの光を混合してできた色は，元の色より明るくなる。

カラーテレビジョンにおいても，原理的には，赤(R)・緑(G)・青(B)の3色の混合比を変えて色を再現する。混合を行うとき，R, G, Bの三原色の量 R, G, B をそれぞれ1とすると，例えば，最もあざやかな緑は $R=0$, $G=1$, $B=0$ で，黄色は $R=1$, $G=1$, $B=0$ として表すことができる（図15(b)）。

（3） 色に対する目の特性

人間の目が，光の波長，すなわち，色によって感じる明るさの割合は，一定ではない。これを相対的に表したのが図16である。図でわかるように，黄がかった緑の光に対して最も感度が高く，青で最も低い。

カラーテレビジョンでは，被写体の明暗に対応する信号（これを**輝度信号**といい，ふつう Y で表す）は，R, G, B, 三つの**原色信号**の量

に対し，R を 30〔%〕，G を 59〔%〕，B を 11〔%〕の割合で混合したものになることが，いろいろな実験の結果から，明らかになっている。こうして作った輝度信号は，白黒テレビジョンの映像信号に対応する。

図 16　比視感度特性

色に対する目のもう一つの性質は，色を識別する視力の方が，明るさを識別する視力に比べて，ずっと低いということである。したがって，画面の細かい部分の色は送らなくてもよく，カラーテレビジョンでは，色の信号は，輝度信号に比べてせまい周波数帯域で送ることができる。

問 6.　輝度信号と原色信号との関係を式で表せ。

（4）　カラーテレビジョンのしくみ

色と目の性質がわかれば，これを白黒テレビジョンの技術につけ加えると，カラーテレビジョンができる。図 17 はカラーテレビジョンの原理を示す図である。

被写体の画像を撮像管でとらえる前に，**色分解プリズム**という色を分解する特殊なプリズムによって，赤・緑・青の三原色の光学像に分解する。分解した光学像は，それぞれカメラの中の 3 本の撮像管によって映像信号に変換する。3 本の撮像管の出力は，音声信号とともに，送信機と送信アンテナでカラーテレビジョン電波として送信する。

受信したカラーテレビジョン電波は，受信回路の中で，音声信号と三原色の映像信号に分離する。これらの映像信号を，カラー受像

図 17 カラーテレビジョンの原理

管の3本の電子銃にそれぞれ加え，電子ビームを制御する。3本の電子銃から出た電子ビームは，それぞれスクリーン面に塗られた赤・緑・青の3色のけい光体に当たり，これを発光させて，カラーの画像を再現する。

問 7. 図17で，カラーテレビジョンの送・受像の順序を簡潔に述べよ。

4. カラーテレビジョン方式

(1) 両立性

カラーテレビジョンをどのような方法で送受するかという，カラーテレビジョン方式を設定するに当たって，当時すでに多数の家庭にあった白黒テレビジョン用の受像機に，影響を与えないような方法を採用することが望まれた。つまり，カラーテレビジョン用の受像機で，白黒テレビジョンの放送が受信できると同時に，白黒テレビジョン用の受像機でも，カラーテレビジョンの放送が受信できる

という方式が必要であった。このような方式を両立性のある方式という。このため，カラーテレビジョン方式は，走査線数・毎秒送像数はもちろんのこと，信号の帯域幅も白黒テレビジョンと同じでなければならない。

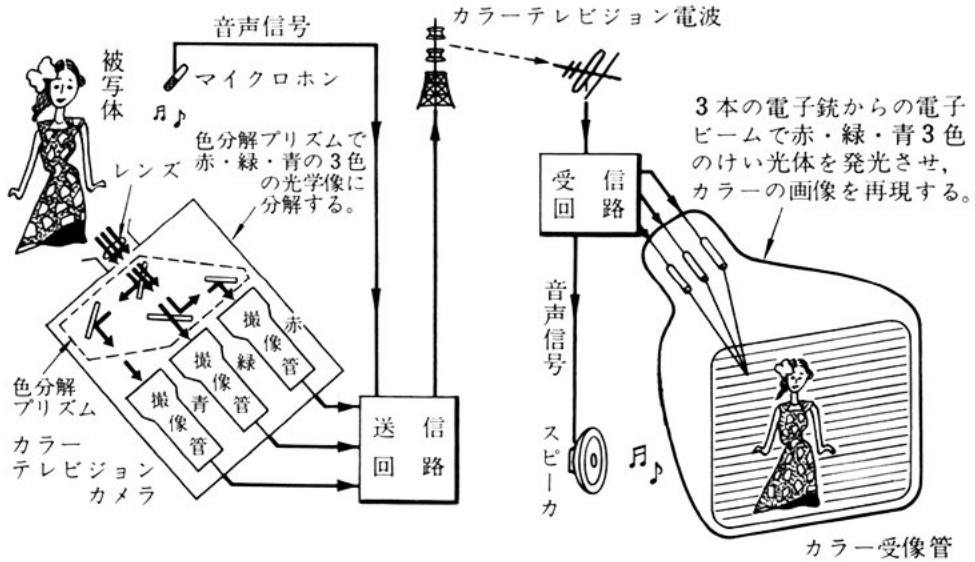
両立性のあるカラーテレビジョン方式の一つに，**NTSC**（National Television System Committee：全アメリカテレビジョン標準方式委員会）**方式**がある。NTSC 方式は，すでに学んだ人間の目の性質をきわめて巧みに応用して，両立性を得た方式で，アメリカ合衆国・日本などが，カラーテレビジョンの標準方式に採用している。

西ドイツ，イギリスなどでは PAL 方式，フランス，ソ連などでは SECAM 方式が，カラーテレビジョンの標準方式として採用されている。この二つの方式は，走査線数 625 本，フレーム数毎秒 25 となっている。

（2） NTSC 方式の原理

NTSC 方式では，両立性を保つため，原色信号をそのまま送らず，輝度を表す輝度信号と，色相・彩度を表す色信号に変換し，輝度信号は白黒テレビジョンの映像信号と同じ帯域幅（4.2〔MHz〕）で送り，色信号は次に述べるような方法で輝度信号の帯域の中に重ねて送っている。

輝度信号 Y は，すでに学んだように，次のような式で表される。

$$Y=0.30R+0.59G+0.11B$$

色信号は，原色信号と輝度信号との差 $R-Y$, $B-Y$, $G-Y$ で代表させることができる。これらを**色差信号**というが，受信側では輝度信号のほかに二つの色差信号があれば原色信号を復元できるので，送る色差信号としては $R-Y$, $B-Y$ を使っている。ただし，すでに学んだように，画像の細かい部分については色の信号を送らない

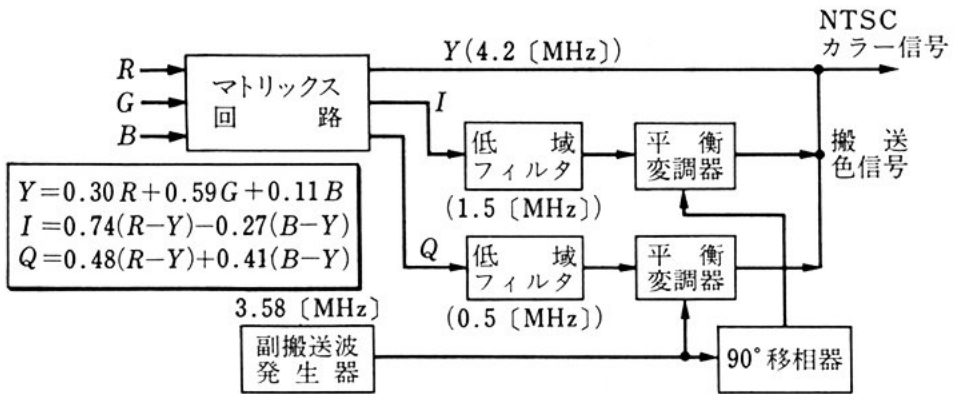



図 18 NTSC カラー信号の発生方法

ので，色差信号の帯域幅は輝度信号の帯域幅よりせまくしている。

実際の NTSC 方式では，色による識別視力の違いを考慮し，図18に示すように色差信号を，視力が最も高い赤橙色に相当する色信号（***I*** **信号**）と，それ以外の色を代表する色信号（***Q*** **信号**）とに変換し，I 信号を 1.5〔MHz〕，Q 信号を 0.5〔MHz〕の帯域に制限して送ることにしている。

I 信号と Q 信号を輝度信号に重ねて送るには，3.58〔MHz〕の副搬送波を使い，これを図 18 のように，それぞれ平衡変調器で変調してから合成する。このとき，両方の信号が混ざり合わないようにするため，両方の変調器に加える副搬送波は 90° の位相差をもたせている。ここで，合成した信号を**搬送色信号**といい，この変調方法を**直角二相変調**という。この搬送色信号を輝度信号に加えたものが，**NTSC カラー信号**である。

NTSC カラー信号の周波数帯域は，図 19(b) のようになり，白黒テレビジョンの映像信号帯域幅（4.2〔MHz〕）の中に，カラーテレビジョンの輝度信号と色信号を収めることができ，搬送色信号の白黒テレビジョン受像機への妨害も少ないので，両立性が確保される。

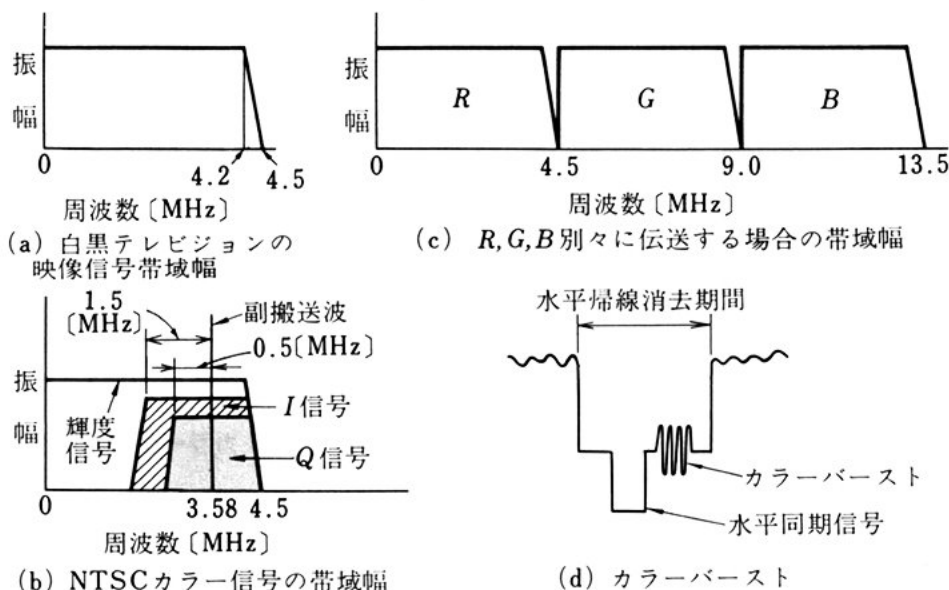



図 19　各信号の帯域幅とカラーバースト

また，図19(c)のようにR, G, Bの三原色を別々に送る場合に比べて，約$\frac{1}{3}$の帯域幅でカラーテレビジョン信号を送ることができる。

なお，NTSCカラー信号では，水平帰線期間の一部に図19(d)のような副搬送波を数サイクルのせる。これを**カラーバースト**という。カラーバーストは，受像機で搬送色信号から，色信号を復調するときの基準となる周波数と位相を伝えるために使っている。

(3)　カラーテレビジョン受像機の構成

図20は，カラーテレビジョン受像機の構成を示す。カラーテレビジョン受像機では，白黒テレビジョン受像機を構成している回路のほか，NTSCカラー信号から搬送色信号を分離して色信号を復調し，これと輝度信号とを合成して，原色信号を再生するための色信号再生回路が付加されている。

受像管には，三原色のカラー受像管が使われている。白黒テレビジョン放送の場合，色信号再生回路は動作せず，カラー受像管は，

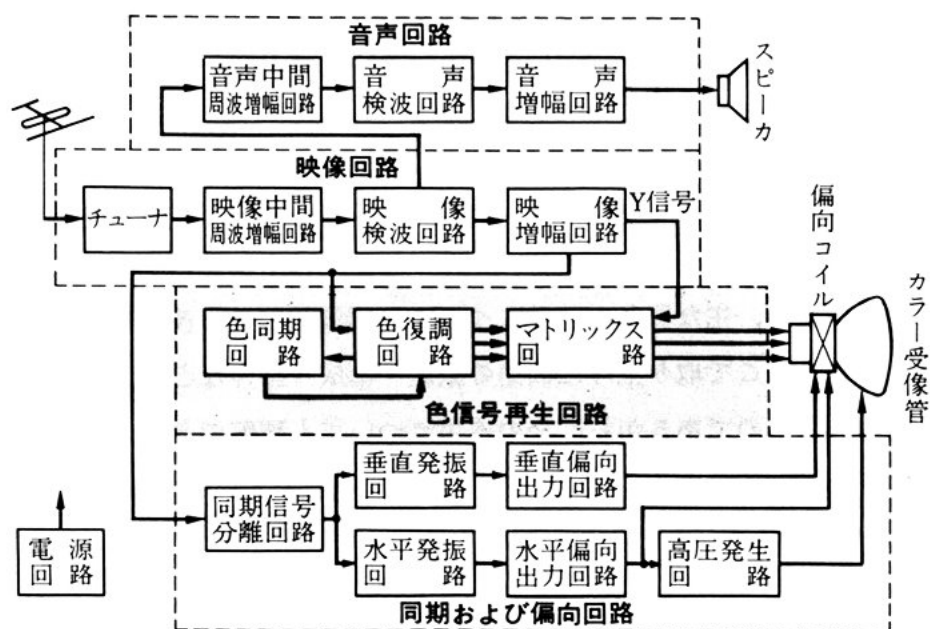



図 20 カラーテレビジョン受像機の構成

三原色とも同じ信号で動作するので，白黒の画像が再生される。

これらの回路には，IC が使用されている。

問 8. NTSC 方式の特徴を述べよ。

問　　題

1. テレビジョン信号の種類とその役割について述べよ。
2. 撮像管の構造について述べよ。
3. テレビジョン放送局の構成について述べよ。
4. テレビジョン電波の波形はどのようなものか。
5. 受像管の構造としくみについて述べよ。
6. テレビジョン受像機は，どのような回路からなりたっているか。
7. カラーテレビジョンの原理について述べよ
8. 色の性質について述べよ。

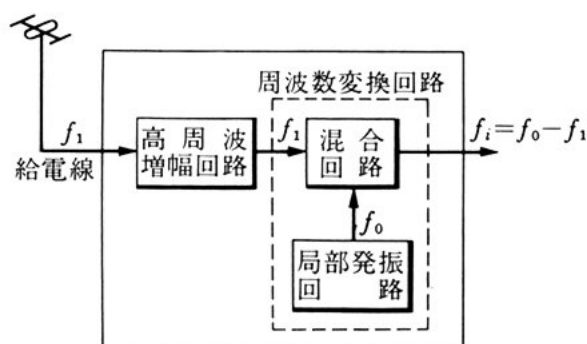
テレビジョン受像機

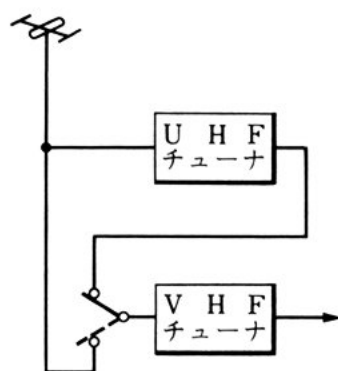
この節のねらい　テレビジョンのしくみとテレビジョン受像機のおよその構成について学んだが，ここでは，実際のテレビジョン受像機の，主な回路と部品について，周波数特性と波形を中心に調べる。ここで取り上げた回路の原理・構成・動作などは，すべて基本的なものであるから，その応用についても理解できるようにすることが大切である。

1.　受像機の回路方式

(1)　チューナ

チューナ（tuner）は，アンテナに到達したいくつかのテレビジョン電波の中から，受信しようとする電波を選択するとともに，増幅しやすい中間周波数に変換する装置である。

図1　チューナの構成

f_1：高周波入力信号の周波数
f_i：中間周波数（＝58.75〔MHz〕）
f_0：局部発振周波数

(a) チューナの構成

(b) オールチャネル受像機のチューナの構成

チューナは，図1(a)に示すように，受信希望の電波を選択して，増幅する高周波増幅回路，高周波信号を中間周波信号に変換する周波数変換回路の二つの回路からなりたっており，映像搬送波の中間周波数としては，58.75〔MHz〕が使われている。

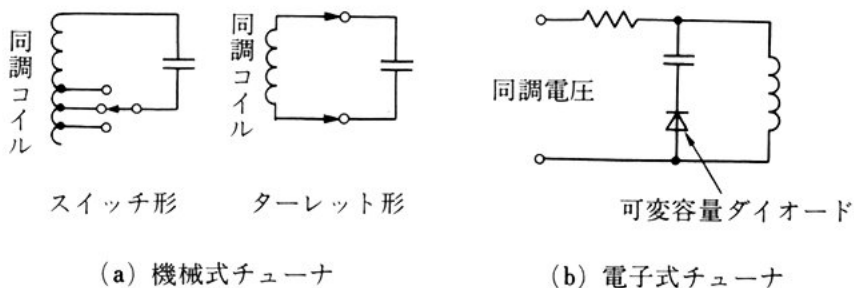
5 図(b)は，オールチャネル受像機のチューナの構成で，第1チャネルから第62チャネルまでのVHF, UHFの全部のチャネルの受信ができる。UHFを受信する場合は，VHFチューナが前置中間周波増幅器として動作するようになっている。

選局は，同調周波数を変化させる方法が用いられ，その方法には
10 機械式チューナと電子式チューナがある。

機械式チューナは，同調コイルを機械的に切り換えて選局するもので，VHF用として図2(a)に示すような二つの方法が用いられる。しかし，UHFチューナでは，可変コンデンサによって同調容量を変えて選局する。

15 **電子式チューナ**は，同調回路中の可変容量ダイオードに加わるバイアスを電圧を切り換え，ダイオードの容量を変化させることによって選局を行う。最近ではタッチ式ボタンを備えた電子式チューナがUHF, VHFともに普及している。

チューナの性能では，アンテナとの整合が良く，内部雑音が少な

図 2 VHFチューナの基本同期回路

(a) 機械式チューナ

(b) 電子式チューナ

く，受信帯域（6〔MHz〕）内の周波数特性の利得差が少ないこと，および局部発振周波数の安定度の良いことなどが要求される。利得差が大きいと，色信号にひずみを生じて，正しい色が再現されなくなる。また，局部発振周波数が変動すると，色が出なくなったり，彩度が変化したりする。妨害波に対する排除能力も高いことが必要である。

問 1. 機械式チューナと電子式チューナにはどんな特徴があるか。

（2） 映像中間周波増幅回路

映像中間周波増幅回路の働きは，チューナから送り込まれた中間周波信号を増幅することである。受像機の性能は，この回路によってほとんど決まるので，じゅうぶんな帯域幅と，良い選択度をもっていなければならない。また，数百マイクロボルトのチューナ出力信号を，1〔V〕程度まで増幅しなければならないので，大きな利得も必要である。

すでに学んだように，テレビジョン電波の周波数帯域は，図3 ア）のような残留側波帯の形で送られてくるが，これをそのまま中間周波増幅回路で増幅・検波すると，映像信号の周波数特性は，イ）のように低域の強調された特性となり，画質が低下する。このような障害を除去するため，中間周波増幅回路では，両側波帯部分の周波数特性をウ）のようにしてある。このときの検波出力は，エ）のように，上下の側波帯成分のある部分が下がり，映像信号は低域から高域まで平らな特性が得られる。このため，映像搬送波は，特性の頂点から−6〔dB〕の位置においてある。

また，この増幅回路では，上下隣接チャネルの映像や音声搬送波，および受信している音声搬送波などが映像回路に混入すると，映像信号と干渉して画質が低下するので，これら妨害となる信号は，じ

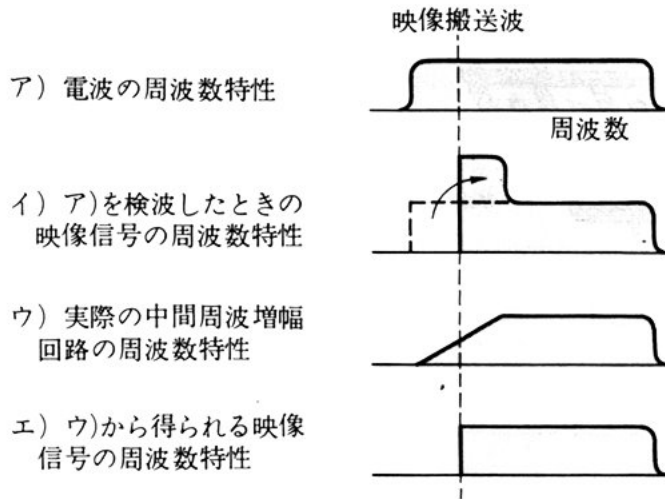



図 3 中間周波特性の説明図

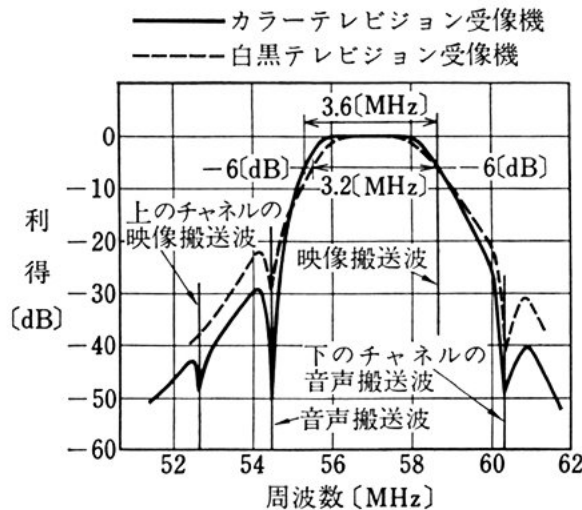



図 4 映像中間周波増幅回路の周波数特性

ゅうぶん減衰させる必要がある。このため，① 映像帯域幅をほぼ3.2〜3.6〔MHz〕とし，② トラップ回路を用いる，などにより，妨害波を減衰させている。図 4 は，このようにして得られた映像中間周波増幅回路の周波数特性である。このような中間周波増幅回路は，表面弾性波フィルタ（**SAW フィルタ**）と 1 チップ IC とで構成される。

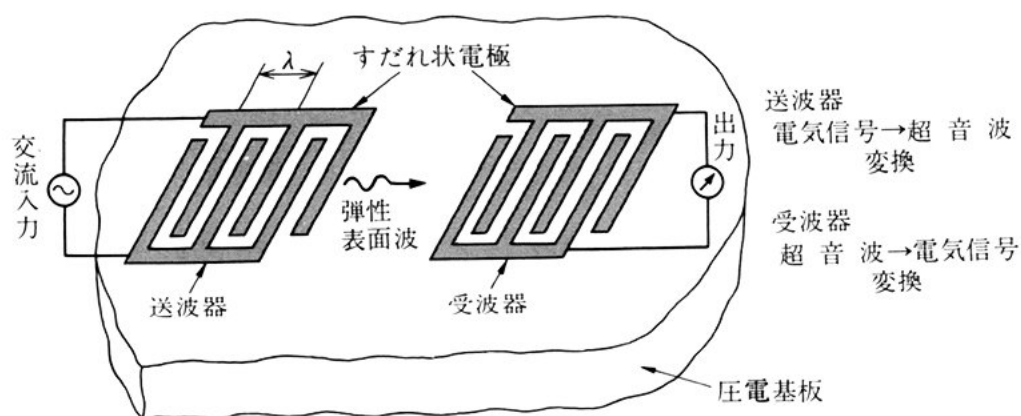



図 5　SAW フィルタ

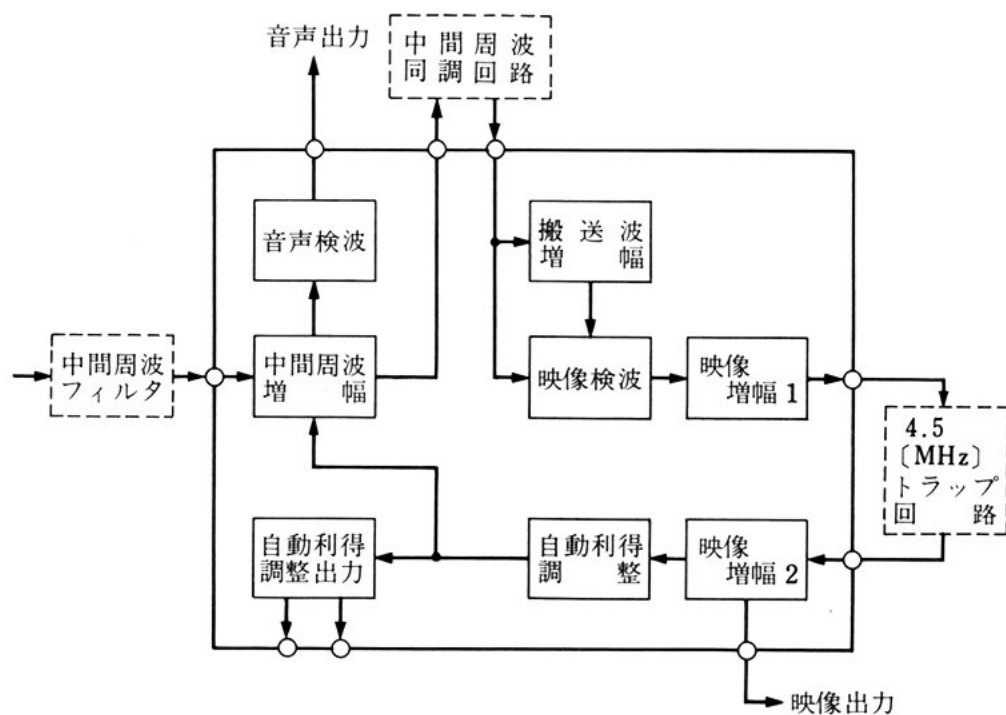



図 6　映像中間周波増幅用 IC の構成例

SAW フィルタは，圧電素子上の弾性表面波の伝搬特性を利用したもので，電極の形状やピッチを変えることによって，所要の選択度特性が得られる（図 5）。

図6は，映像中間周波増幅と，次に学ぶ映像と音声の検波回路，映像増幅回路を含むICの構成例である。

(3) 映像検波回路

映像検波回路は，図7に示すような搬送波再生形同期検波回路が用いられる。この回路は，中間周波増幅回路から映像搬送波だけを狭帯域の同調回路で抜き出し，振幅制限回路と同調回路で完全な正弦波にした映像搬送波を，元の中間周波信号と掛け合わせて，映像信号だけを取り出す働きをする。このような検波の方法を**同期検波**という。

この検波回路は，直線性が良いので，映像信号を少ないひずみで再生できること，小さな信号振幅でも動作するので，IC化に適しているという特徴がある。

映像検波回路の後にトラップ回路を入れ，音声中間周波の4.5〔MHz〕成分を除去して，映像信号が得られる。

(4) 音声検波回路

映像検波出力または，中間周波増幅段出力から4.5〔MHz〕の音

図7 映像検波回路の例

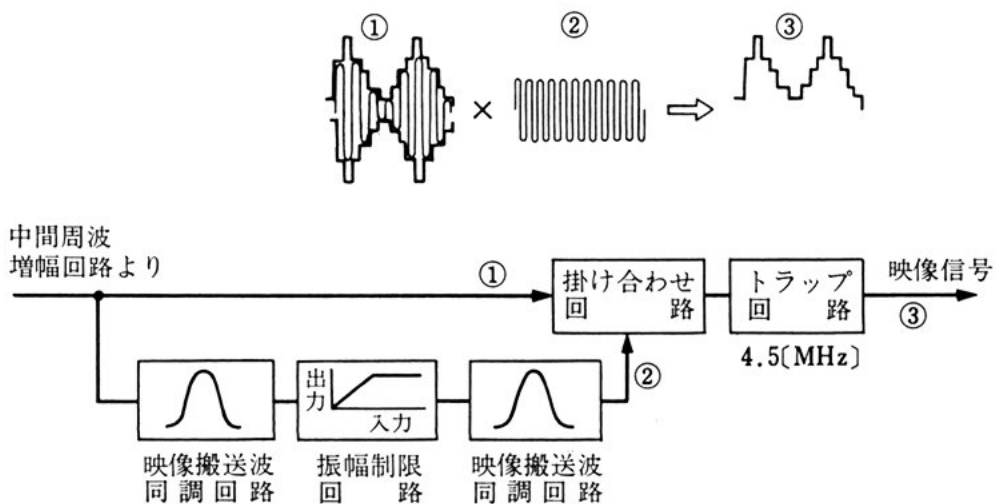
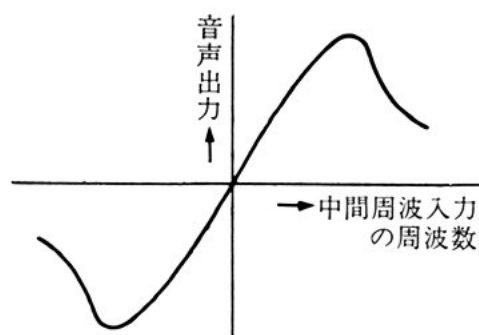



図 8　FM 検波器の特性

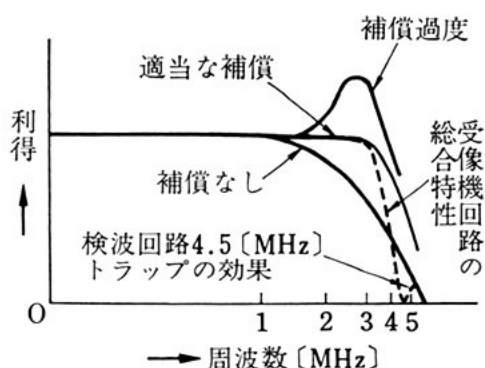



図 9　映像増幅回路の特性と周波数特性の補償

声中間周波信号を取り出す。

この信号は，音声信号によって周波数変調されているので，これを音声中間周波増幅回路で増幅し，図8に示すような特性の回路を通し，周波数変調波を復調することにより，音声信号を取り出す。

テレビジョン音声信号は，周波数範囲が 30～15000〔Hz〕で送られており，音声多重放送が受信できる受像機では，主音声信号に多重して送られてくる副音声信号を検波する回路が付属している。

（5）映像増幅回路

映像増幅回路は，検波して得られた小振幅の映像信号を，受像管が動作するまで増幅する。この増幅回路は，数十ヘルツの低周波から 3～4〔MHz〕の高周波まで一様に増幅する。また，もし色副搬送波が残っていると，画面上にドット状の妨害が現れるので，3.58〔MHz〕のトラップ回路を途中に入れて，この副搬送波成分だけを減衰させるように動作する。

映像増幅回路の，低い周波数領域の特性がわるいと，尾を引いたような画像が出たり，垂直同期が不安定になったりする。また，高い周波数領域の特性がわるいと，ぼやけたような画像になる。このような広帯域の増幅には，専用の IC が用いられている。

2. 同期および偏向回路

(1) 同期信号の分離

受像管の電子ビームの走査に必要な同期信号は，映像信号から分離して得られる。映像信号の映像の成分と，同期信号とは，極性が違っているので，この性質を利用すれば，映像信号から同期信号を分離することができる。このようにして分離する方法を**振幅分離**という。

いま，図10のように，npn 形トランジスタの入力側に，1〔V〕以上の負極性の映像信号を加えると，同期信号の期間だけベース電流およびコレクタ電流が流れ，出力には負極性の同期信号を取り出すことができる。

問 2. pnp 形トランジスタを用いて同期信号を分離するには，どのようにすればよいか。

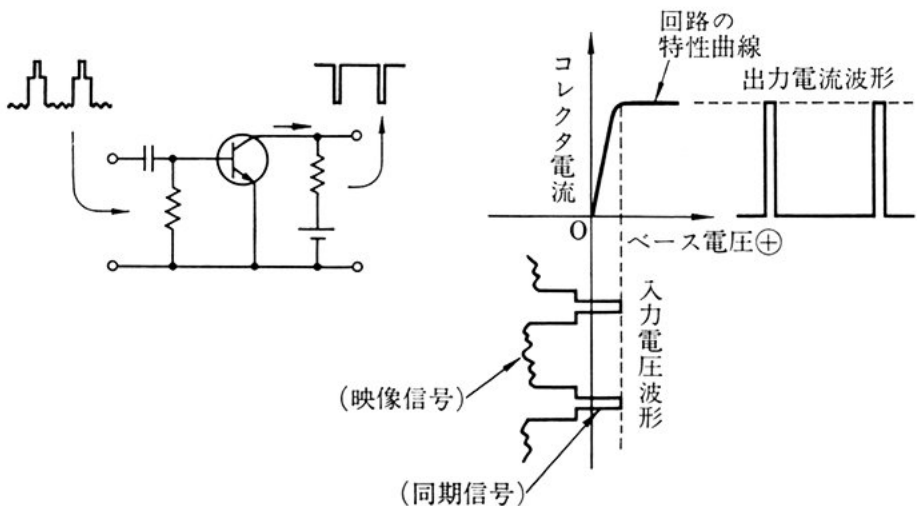



図 10 同期信号の分離

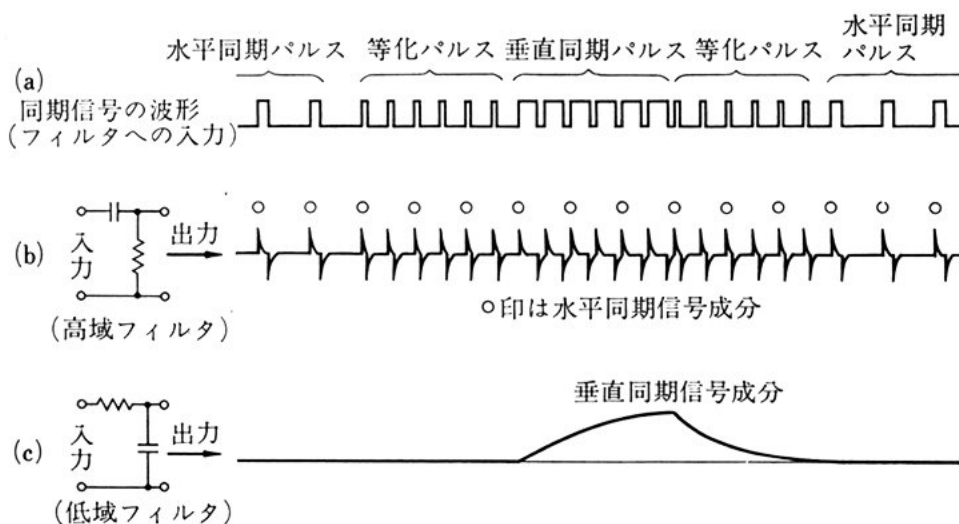
(a) 同期信号分離回路　(b) 回路の動作

（2） 水平・垂直同期信号の分離

分離して得られた同期信号は，図11(a)のように，水平同期パルス・等化パルス・垂直同期パルスからなり，水平同期信号成分は，垂直同期パルスおよび等化パルスの中にも含まれている。この中から水平・垂直の二つの同期信号成分を分離する必要がある。

一般に，同期信号のようなパルス波形は，広い範囲の周波数成分を含んでいるが，垂直同期信号のように幅が広く，繰返し周波数が低い場合は，比較的低い周波数成分を含み，それに対し，幅がせまく，繰返し周波数が高い水平同期信号は，比較的高い周波数成分だけを含んでいる。この性質を利用すれば，水平同期信号成分と垂直同期信号成分を分離することができる。このように，周波数成分の違いを利用して分離する方法を**周波数分離**という。

図11(b)の回路は，抵抗とコンデンサを組み合わせた高域フィルタ回路で，この回路の入力端子に図(a)の同期信号を加えると，出力には図(b)のような水平同期信号成分が得られる。図(c)の回路は，抵抗とコンデンサを組み合わせた低域フィルタ回路で，入力端子に

図 11　水平同期信号と垂直同期信号の分離

図(a)の同期信号を加えると，出力には，図(c)のような垂直同期信号成分だけが得られる。

問 3. 図11の回路を微分回路・積分回路ということばでよぶことがある。どの回路がそれに相当するか，回路の働きから説明せよ。

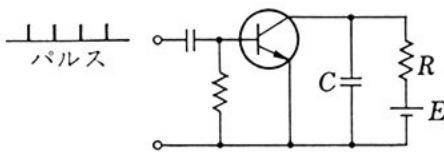
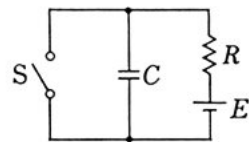
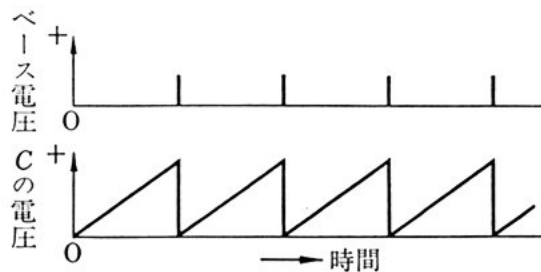
5

(3) 垂直偏向回路

受像管の偏向コイルに流す電流は，60〔Hz〕ののこぎり波状電流である。この電流を流すため，垂直偏向回路では，まず，のこぎり波状電圧を垂直発振回路で発生させ，これを垂直出力回路で増幅して，のこぎり波状電流に変換する。

10

のこぎり波形の発生は，トランジスタのスイッチ作用を使い，図12(a)のような回路で行う。この回路は，ベースに同期信号に同期した正極性のパルスを加え，その期間だけコレクタ電流が流れ，パルスがなくなると，コレクタ電流が流れないようになっている。図(b)は，この回路の等価回路で，パルスのない期間はスイッチSは開

図 12　のこぎり波状電圧発生回路

(a) のこぎり波状電圧発生回路

(b) 左図の等価回路

(c) 入出力の波形

いてコンデンサ C が充電され，パルスのある期間はスイッチSが閉じてコンデンサ C が放電される。

この結果，図(c)に示すように，コンデンサ C の両端に，のこぎり波状電圧が得られる。

垂直発振回路は，垂直同期信号に同期するパルス発生回路と，このこぎり波状電圧発生回路とが組み合わされている。

垂直偏向出力回路には，音声出力増幅回路とほとんど同じ回路が使われている。

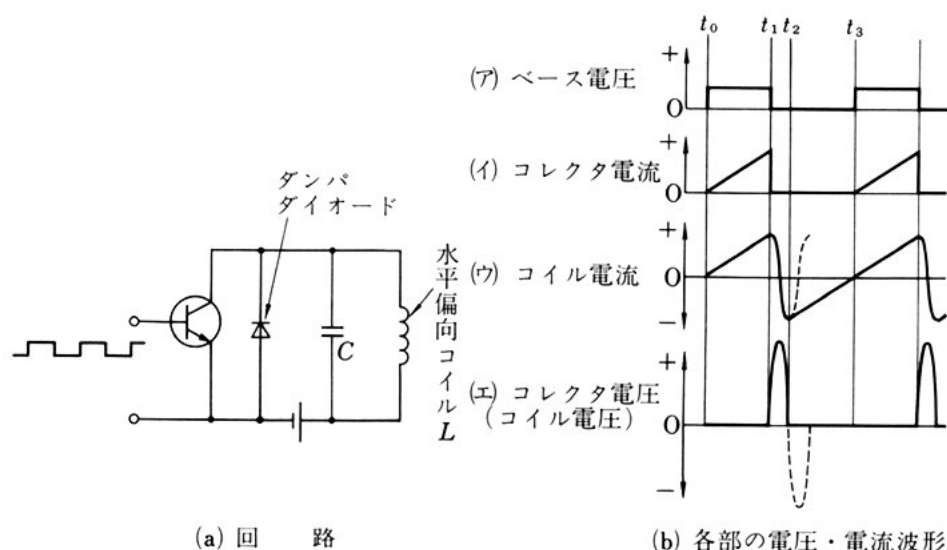
（4） 水平偏向回路とその出力波形

水平偏向回路は，水平偏向コイルに15.75〔kHz〕ののこぎり波状電流を供給する回路である。これには，トランジスタの回路では，トランジスタをスイッチとしたのこぎり波状電流の発生回路が使われている。このため，水平発振回路は，水平同期信号に同期したパルスを発生すればよい。

図13(a)にトランジスタを使った水平偏向出力回路の基本回路を

図 13　のこぎり波状電流の発生

(a) 回　　路

(b) 各部の電圧・電流波形

示し，図(b)にその動作波形を示す。水平偏向コイル L は，インダクタンス分が抵抗分に比べて非常に大きいので，インダクタンスだけとみなして差し支えない。したがって，L にのこぎり波状電流を流すには，偏向コイルの両端に加える電圧を断続するだけでじゅうぶんである。この回路でも，トランジスタはスイッチとして動作する。ダンパダイオードは，スイッチの開閉のさいに生じる水平偏向コイル中の振動電流を吸収する働きをしている。

なお，コイル電圧は，ふつう数百ボルトのパルス電圧になるので，これを変圧器で 10〔kV〕以上に昇圧し，高圧用ダイオードで整流して，受像管のアノード電圧に利用している。このための変圧器を**フライバックトランス**という。

問 4. 水平および垂直同期信号は，受像機内でどのように処理されるか。
問 5. 水平偏向出力回路の働きについて述べよ。

3. 色信号再生回路とカラー受像管

(1) 色信号再生回路の構成

すでに学んだように，NTSC 方式では，輝度信号に搬送色信号を重ね合わせるという方法で，色信号を送っている。このため，カラーテレビジョン受像機では，搬送色信号の中から I，Q 信号を取り出し，これを色差信号に変換して輝度信号と加え合わせることにより，三つの原色信号を再生する必要がある。しかし，現在の受像機では，回路を簡単にするため，搬送色信号から色差信号を直接取り出すようになっている。

図 14(b)は，カラーテレビジョン受像機の色信号再生回路の構成を示したものである。この中で，色復調回路は，搬送色信号を映像

(a) 搬送色信号に含まれる変調波の位相関係

(b)

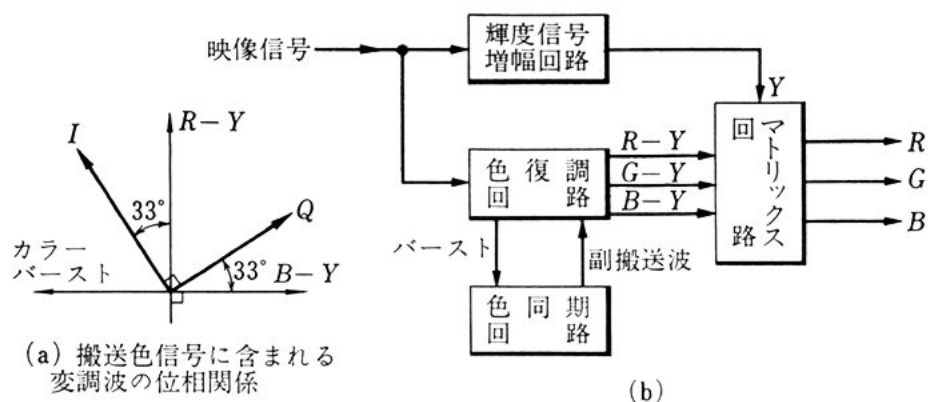



図 14　搬送色信号と色信号再生回路の構成

信号から分離し，色差信号を復調する回路であり，色同期回路は，色復調回路で必要な副搬送波を発生する回路である。また，マトリックス回路は，色差信号と輝度信号から原色信号を再生する回路である。

(2) 色復調回路

搬送色信号は，I 信号と Q 信号とでそれぞれ副搬送波を平衡変調して合成したものであるが，I 信号と Q 信号は色差信号 $R-Y$, $B-Y$ から変換したものであるから，搬送色信号には $R-Y$, $B-Y$ の変調波成分も含まれている。これらは，図 14 (a) に示すように，I, Q 信号の変調波成分の位相に対し，それぞれ 33° の位相差をもっている。したがって，やはり互いに 90° の位相差をもっている。このような平衡変調波は，色復調器で復調することができる。

この回路には，送信側の副搬送波と等しい副搬送波が必要であるが，入力変調波とこの副搬送波の位相差が 0° または 180° のとき出力が最大となり，90° になると出力が 0 となる特性がある。したがって，このような復調器を 2 組用意し，副搬送波の位相を，一方は $R-Y$ の変調波成分，他方は $B-Y$ の変調波成分に一致させれば，

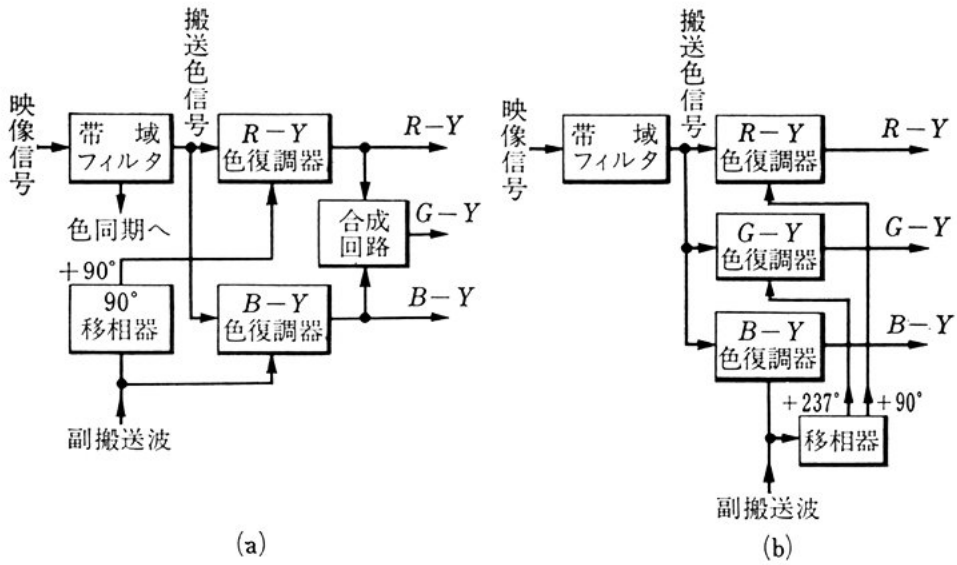



図 15 色復調回路の構成

これらの間の位相差は90°であるから，互いに他の成分の出力は0になり，二つの色差信号成分をそれぞれ独立に取り出すことができる。なお，搬送色信号は，帯域フィルタで映像信号から分離する。

もう一つの色差信号 $G-Y$ は，図15(a)に示すように，$R-Y$，$B-Y$ 信号出力から合成することができる。また，図(b)のように，復調器をもう一つ用意し，これに加える副搬送波の位相を，$R-Y$，$B-Y$ の場合より少しずらすと，$R-Y$，$B-Y$ 信号成分が混合して復調されるので，この位相を適当に選ぶと，$G-Y$ 信号を直接復調することもできる。

問 6. 色差信号を再生するには，いくつ色復調器が必要か。

(3) 色 同 期 回 路

色同期回路は，安定な副搬送波を発生させるための水晶発振回路と，この発振周波数と位相を送信側の基準周波数であるカラーバーストに一致させるための制御回路とからなりたっている。

図16は，色同期回路の構成例を示したもので，搬送色信号とカ

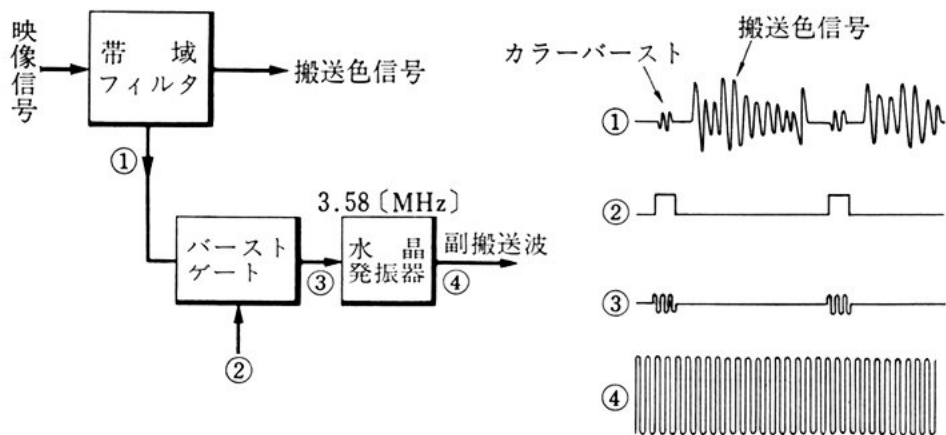



図 16　色同期回路の構成例

ラーバーストからできているゲートパルス①と，水平同期信号から作ったバースト抜き取り用のゲートパルス②を，バーストゲートとよばれる回路に加えると，カラーバーストだけ抜き取られた波形③が得られる。この波を水晶発振回路に加えると，その発振周波数は，断続的に入ってくるカラーバーストの周波数に同期して，同じ周波数となり，位相も一致する。

（4）　マトリックス回路および映像出力回路

一般に，いくつかの信号を組み合わせて，別の信号を作る回路を，**マトリックス回路**という。

輝度信号と三つの色差信号から三つの原色信号を取り出すには，各色差信号に輝度信号を加え合わせればよい。このためには，映像増幅回路からの輝度信号 Y と色復調回路からのおのおのの色差信号を図17に示すようなトランジスタ回路で混合する方法が用いられている。この回路は同時に，カラー受像管を駆動するための映像出力回路としての役割も果たしている。このため，この回路では，受像管を動作させるのにじゅうぶんな大きさの信号が，低周波から高周波まで広い周波数範囲にわたって取り出せることが必要である。

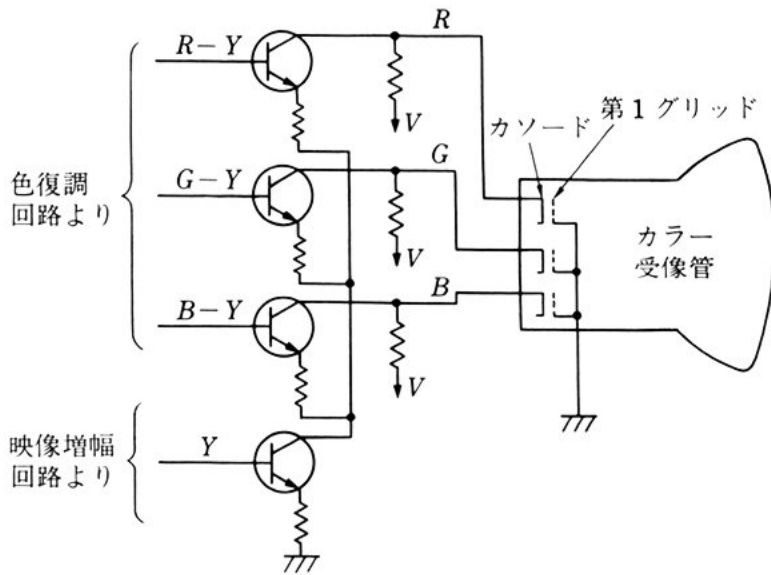



図 17　マトリックス回路および映像出力回路

(5) カラー受像管

図18は，カラーテレビジョン受像管としてよく用いられるスロット形シャドーマスク（**スロットマスク**）をもつ受像管の原理的構造を示す。けい光面はR, G, Bの3色のけい光体が短ざく形に塗られ，水平に並んだ3本の電子銃と，けい光面より手前約10〔mm〕に取り付けられたスロットマスクとからできている。

赤・緑・青の3本の電子銃は，小形化のため，カソード以外の電極を3色共通にした一体化構造になっている。けい光面の手前にあるスロットマスクには，幅0.2〔mm〕，長さ〔0.6mm〕程度のスロットが，約0.6〔mm〕の間隔であけられている。

けい光面には，幅0.35〔mm〕程度のR, G, Bの短ざく状けい光体が一組ごとに上下にずれた配列で塗布されていて，これらのけい光体スロットマスクは，図のような関係になっている。短ざく状のけい光体以外の部分は，カーボンで黒く塗付し，明るい場所で画面

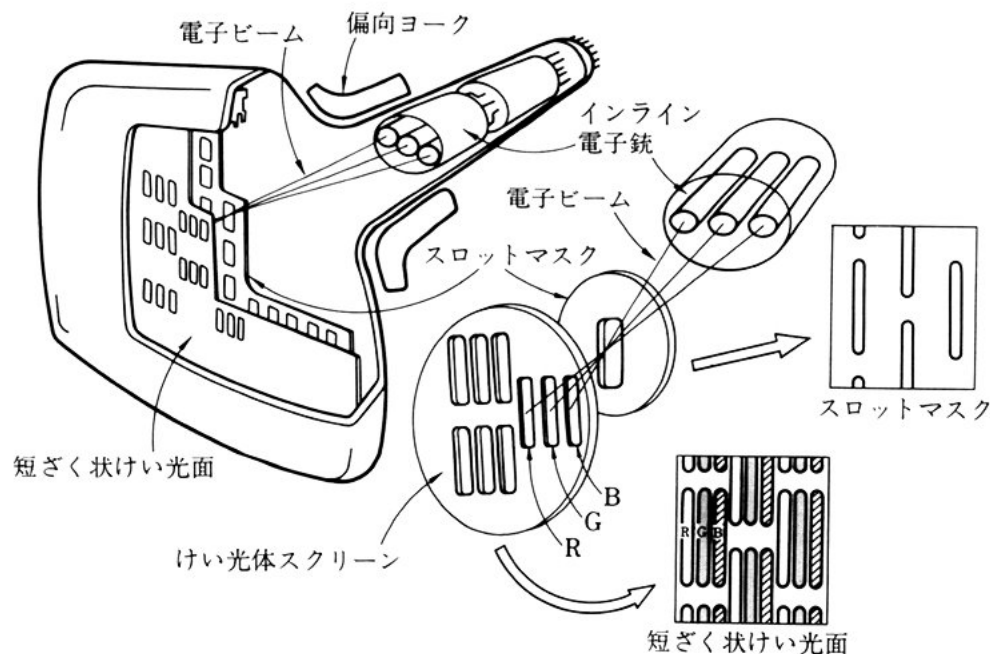



図 18　カラー受像管の原理（スロットマスク形）

を見る場合でも，コントラスト比が下がらないようになっている。

赤・緑・青の電子銃から発射された３本の電子ビームは，スロットマスクの孔（あな）を通り，それぞれの電子ビームに対応したけい光体を発光させる。

例えば，赤の電子銃から発射された電子ビームは，赤く発光するけい光体に達するようになっている。したがって，各電子銃にそれぞれの色信号を入れると，けい光面上には，小さな３色の点が現れる。これらの色の点の配列によって，カラー画像が再生される。いま，R，G，B のけい光体の全面に，電子ビームが同時に達したとすると，われわれの目には白く見える。

カソードから放出された電子流は，制御グリッドの電圧でその量が制御され，加速グリッドで加速され，集中電極と，集中電極によ

る電界の静電レンズ作用とによって集束され，細いビームとなってけい光面に達する。

実際の受像管では，電子ビームの集束をより改善するため，電極の数を増やした電子銃も用いられている。

図 19 インライン電子銃をもつカラー受像管（90度管）

アノード電圧は，白黒の場合より高い電圧が必要で，＋20〔kV〕以上の電圧が使用されている。

電子銃からの3本の電子ビームは，スロットマスクで1点に集中する必要がある。このことを**コンバーゼンス**（または**集中**）といい，電子ビームを集中させるため，外部から電子ビームに磁界を加えて，その軌道をそれぞれ調整している。この調整を**コンバーゼンス調整**という。

初期のカラー受像管には，3本の電子銃を△形に互いに120°隔てて並べ，丸形のシャドーマスクとけい光体ドットを用いたものであった(図20)。このシャドーマスク形受像管は，スロット形受像管と比べて，明るさ，調整のしやすさ，地磁気の影響などの点で劣るので，しだいに使用されなくなっている。

図 20 カラー受像管の原理（シャドーマスク形）

このほかのカラー受像管として，1本の電子銃から3本の電子ビームを取り出し，シャドーマスクの代わりに格子(こうし)状のスリットを使

(a) 格子状スリット

(b) ストライプ状けい光面

図 21　縦に帯状にけい光体を塗布したカラー受像管の原理

い，縦に帯状にけい光体を塗布した構造のカラー受像管もある（図21）。

問 7. カラーテレビジョン受像機で，白黒の画像を再生することができる。白・黒・灰の再生に，各電子銃はどのように動作するか。

問　題

1. 色復調の方式について述べよ。

2. 輝度信号と色差信号の関係を述べよ。

3. 垂直偏向回路と水平偏向回路とは，どのような点が異なるか。

5 **4.** 色同期が行われないと，カラー受像機の画面はどうなるか。

5. 飛越し走査を行わせるためには，走査本数は奇数でなければならない。なぜか。

6. ヨーロッパの多くの国では，走査線数625本，フレーム数毎秒25の標準方式を使っている。水平および垂直走査周波数はいくらか。

10 **7.** テレビジョン受像機の映像帯域幅は，どの回路で決まるか。

8. テレビジョン受像機の受像管用高圧電源は，どのようにして得ているか。

9. NTSCカラー信号では，三つの色差信号 $R-Y$，$B-Y$，$G-Y$ のうち，$R-Y$，$B-Y$ の二つの信号しか送っていないのはなぜか。

15 **10.** 白黒テレビジョン受像機とカラーテレビジョン受像機の相違点を述べよ。

問 題 解 答

第1章 電子と電子管

1 節

問 2. 3.20×10^{-19} [J] **問 3.** Cs: 653 [nm] (λ_c から), 685 [nm] (熱電子放出から), Mo: 299 [nm], 299 [nm], W: 273 [nm], 273 [nm], Ni: 248 [nm], 247 [nm], Pd: 249 [nm], 248 [nm], Ba: ——, 588 [nm] **問 4.** 5.93×10^{7} [m/s]

問題 2. 28.4 [kV] **3.** 3.79×10^{-11} [s]

2 節

問 1. 140 [mA]

問題 4. 0.0787 [m] **5.** 5×10^{4} [m/s]

第2章 半導体素子

1 節

問題 2. 4.11×10^{20} [m^{-3}] **6.** 180 [mW]

2 節

問題 4. $h_{fe}=200$, $h_{oe}=15$ [μS], $h_{ie}=2$ [kΩ], $h_{re}=0.001$

5. 2 [MΩ] **7.** 3.5 [ms] ($V_{DS}=-10$ [V] 一定)

第3章 電 子 回 路

1 節

問 3. エミッタ接地: $A_v=-66.7$, $A_i=100$, $A_p=6670$, ベース接地: $A_v=66.7$. $A_i=-0.99$. $A_p=66.0$, コレクタ接地: $A_v=1$, $A_i=-100$. $A_p=100$

問 4. エミッタ接地: $G_v=36.5$ [dB], $G_p=38.2$ [dB], ベース接地: $G_v=36.5$ [dB], $G_p=18.2$ [dB], コレクタ接地: $G_v=0$, $G_p=20$ [dB]

問題 3. -3, -600 **4.** -1.96

2 節

問 2. 398 [kHz] **問 3.** 106 [Hz]

問題 1. 5.28×10^{-4} [H]

第4章 電 気 通 信

1 節

問 2. 0.05 [V/Pa], -46.0 [dB] **問 3.** 5.62×10^{-3} [V] **問 7.** 1.9×10^{-4} [m]

問題 5. 0.05 [V]

2　節

問 4.　256，シフト方式では 508　**問 5.**　50［ボー］　**問 7.**　183

問 8.　428.6［字/分］　**問 16.**　6　**問 18.**　48［kHz］

3　節

問 1.　20［dB］，80［dB］，140［dB］　**問 2.**　3.33×10^{7}［m/s］

問 3.　25［m］，15.9［m］　**問 5.**　123［dB］

問題 6.　10［Hz］　8.　2.65×10^{-7}［W］

4　節

問 1.　60［m］　**問 4.**　3.5×10^{-7}［m］

第5章　テレビジョン

1　節

問 2.　約 490 本　**問 6.**　$Y=0.30R+0.59G+0.11B$

2　節

問 6.　2ないし3個

問題6.　15.625［kHz］，50［Hz］

索　　引

へ

ほ

ま

み

む

め

も

や

ゆ

ら

り

れ

ろ

■別記著作者

安居院　猛　　福室　宏
押本愛之助　　宮川　浹
金子　誠司
日下　秀夫
斎藤　隆仁
寺村　浩一
沼口　安隆

●表紙・扉AD
多川精一　＋　中野達彦
（東京エディトリアルセンター）

●表紙
飯田　敏行

電気技術II A

7	実教	工業　065

昭和57年3月31日　文部省検定済
昭和58年2月25日　初版発行
平成2年1月20日　印　刷
平成2年1月25日　発　行

©著作者――●
大河内正陽　ほか9名（別記）

発行者――●
実教出版株式会社
代表者　奥脇　誠治
東京都千代田区五番町5

印刷者――●
中央印刷株式会社
代表者　日岐　弘登
東京都新宿区新小川町4－24

発行所――●
実教出版株式会社
〒102　東京都千代田区五番町5
電話　03－238－7700（代表）
振替　東京　4－183260

定　価――●
文部大臣が認可し官報で告示した定価〔消費税に相当する金額を含む〕（上記の定価は，各教科書取次供給所に表示します）